

УДК 629.735

А.П. Кузнецов, канд. техн. наук,  
В.В. Гаврилко, канд. техн. наук,  
А.В. Кондратьев, канд. техн. наук,  
В.А. Коваленко, д-р техн. наук,  
Ю.В. Плисак,  
А.А. Чумак

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН УСИЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПАНЕЛИ КОНЦЕНТРАТОРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В настоящее время в отечественной и мировой практике одним из направлений совершенствования космической техники является повышение эффективности солнечных батарей (СБ), обеспечивающих электроэнергией всю бортовую аппаратуру космических аппаратов посредством фотоэлектрических преобразователей энергии (ФП) [1]. Это стимулирует поиск и разработку новых конструктивно-технологических решений для агрегатов данного класса в рамках современных достижений энергетики, материаловедения и информационных компьютерных технологий [2 – 4]. Данная проблема нашла отражение и в наших работах, например [5 – 7]. Весьма актуальным представляется создание перспективных концентраторных СБ [8]. Из существующих способов концентрирования солнечного излучения наиболее приемлемым для использования в условиях космического пространства является способ концентрирования с помощью линейных линз Френеля [9]. Промежуточное концентрирование до 1000 крат с помощью такой системы линз с оптическим коэффициентом полезного действия до 90% приводит к пропорциональному снижению площади и удельной стоимости ФП и, как следствие, снижению стоимости СБ и повышению ее эффективности [9].

Для СБ данного класса при участии специалистов Научно-исследовательского технологического института приборостроения был разработан опытный вариант углепластикового сегмента панели оригинальной конструктивно-силовой схемы (КСС), состоящей из нижней обшивки, гофрированного полукаркаса, вершины которого усилены, и стрингеров для фиксации линз Френеля (рис. 1) [10 – 12].

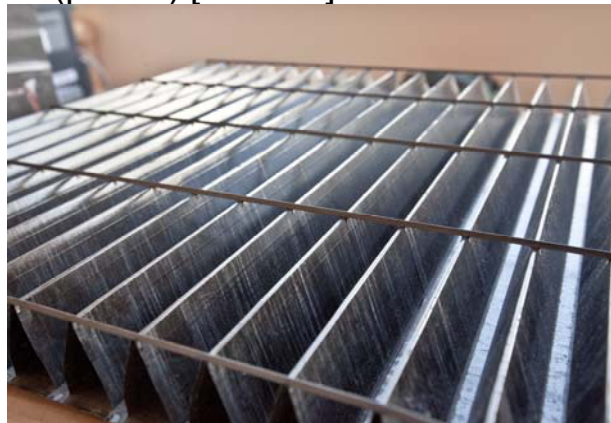
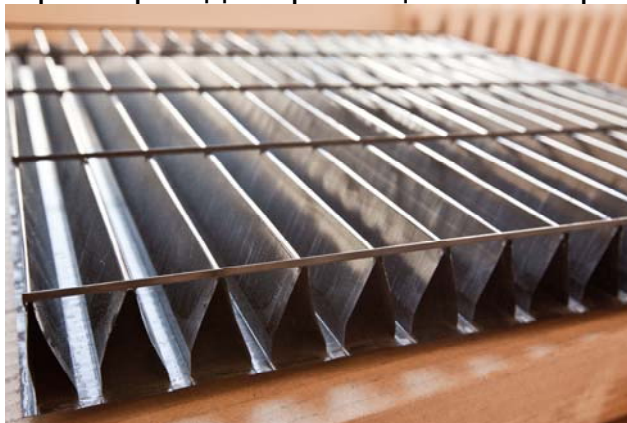


Рисунок 1 – Опытный вариант сегмента панели концентраторной СБ

Проведенные дальнейшие исследования позволили разработать несущую углепластиковую конструкцию панели концентраторной СБ космического назначения [13]. КСС панели состоит из несущей рамы, к которой крепятся 20 сегментов для фиксации линейных концентраторов светового потока на основе линз Френеля (рис. 2).

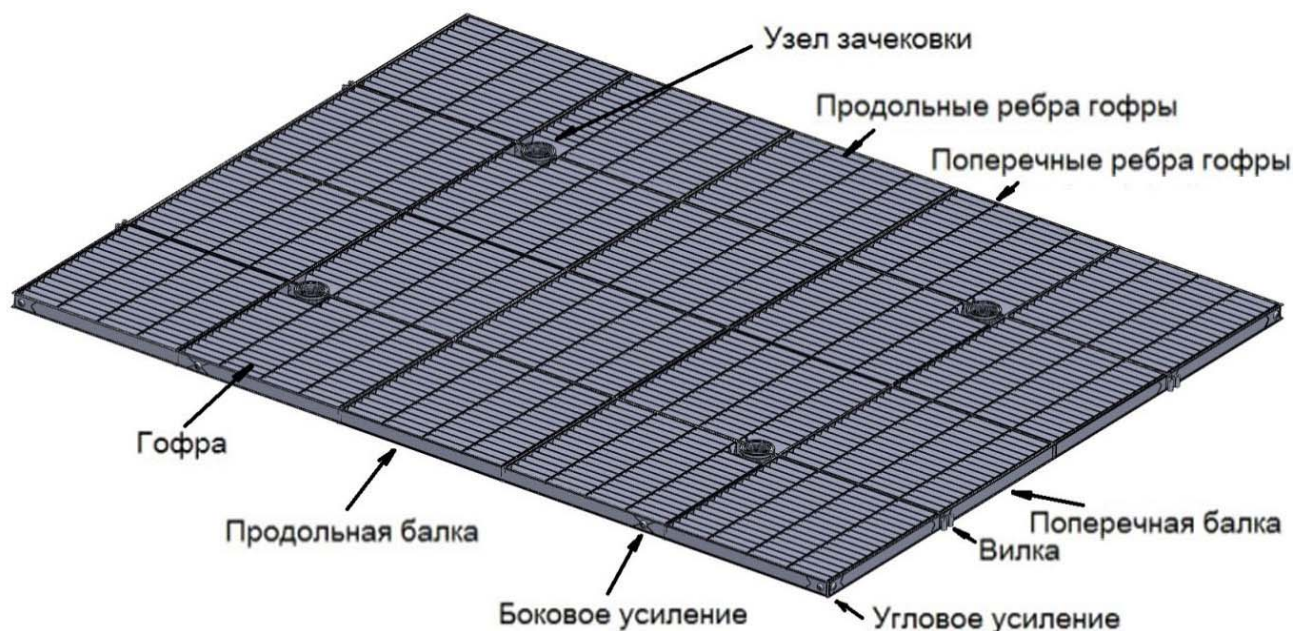


Рисунок 2 – Модель разработанной КСС панели СБ

Для проверки соответствия разработанной КСС панели СБ всем техническим требованиям было оценено напряженно-деформированное состояние (НДС) ее основных элементов для всех регламентированных расчетных случаев нагружения и детально проанализировано их взаимодействие в составной системе [13]. Анализ полученных картин напряженного состояния в рамках принятых допущений показал, что наблюдаемая модельная концентрация напряжений в районе замков зачековки и вилок для установки шарнирных узлов является нереалистично завышенной и требует более детального исследования.

Целью данной статьи является исследование напряженного состояния локальных зон усиления в районе этих узлов.

Анализ параметров НДС и условий совместной работы несущей рамы и сегментов для фиксации линз Френеля для всех регламентированных расчетных случаев нагружения показал, что изгиб панели СБ при статических приемо-сдаточных испытаниях (ПСИ) является интегральной мерой всех воздействий среды эксплуатации. Поэтому представляется обоснованным проведение дальнейших исследований НДС конструктивных элементов панели СБ при действии на нее только статических изгибающих нагрузок при ПСИ, схемы которых показаны на рис. 3\*.

\* В основе проведенных исследований, как в плане регламентации геометрических параметров панели СБ, так и нормирования нагрузок на изделие, были использованы данные ОАО «Информационные спутниковые системы» им. М.Ф. Решетнева.

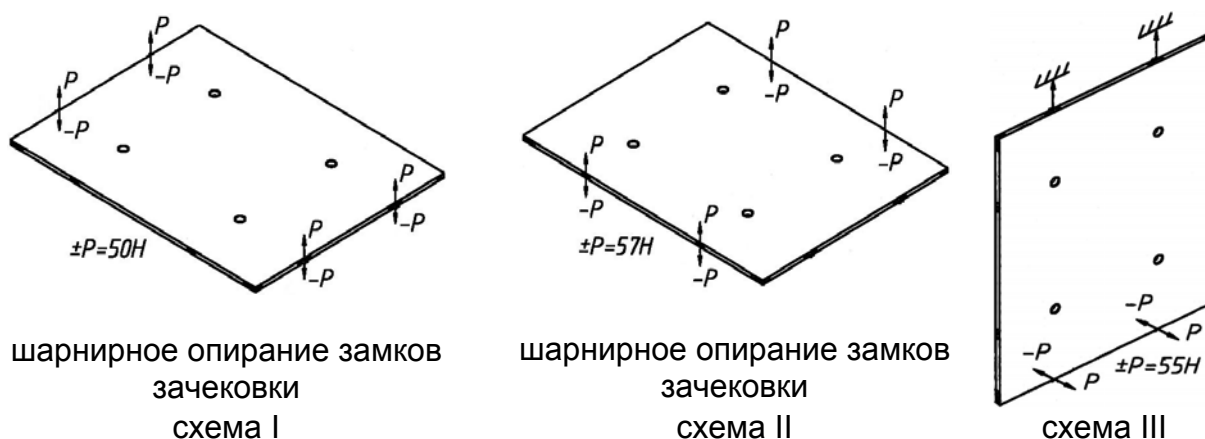


Рисунок 3 – Схемы статических испытаний на изгиб СБ при приемосдаточных испытаниях

При исследовании локального напряженного состояния в районах узлов зачековки и вилок для установки шарнирных узлов из КСС панели СБ были вычленены следующие элементы:

- изолированная продольная балка для первой и третьей схем ПСИ (рис. 4, а);
- фрагмент несущей рамы, включающий в себя части двух поперечных и пяти продольных балок для второй схемы ПСИ (рис. 4, б).

Данное упрощение, не учитывающее работы сегментов панели СБ, позволило проанализировать с потребной точностью и оперативностью расчет локальное НДС в районе узлов зачековки и вилок для установки шарнирных узлов в запас по их несущей способности.

При расчетах принято, что для изготовления всех элементов КСС панели СБ используется полимерный композит на основе углеродного наполнителя со среднестатистическими величинами физико-механических характеристик (ФМХ), приведенных в табл. 1.

Таблица 1 – Принятые ФМХ используемых углепластиков

| Толщина монослоя $t$ , мм    | $E_1$ , ГПа | $E_2$ , ГПа | $G_{12}$ , ГПа | $\mu_{12}$ | $\sigma_{в1}^+$ , МПа | $\sigma_{в1}^-$ , МПа | $\sigma_{в2}^+$ , МПа | $\sigma_{в2}^-$ , МПа | $\tau_{\sigma 12}$ , МПа | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|------------------------------|-------------|-------------|----------------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|
| Однонаправленный углепластик |             |             |                |            |                       |                       |                       |                       |                          |                            |
| 0,02                         | 150         | 8           | 4              | 0,3        | 1300                  | 1200                  | 40                    | 100                   | 60                       | 1520                       |
| Тканый углепластик           |             |             |                |            |                       |                       |                       |                       |                          |                            |
| 0,1                          | 60          | 60          | 6              | 0,28       | 400                   | 400                   | 400                   | 400                   | 50                       | 1500                       |

В дальнейшем для оценки несущей способности композитных элементов КСС панели СБ использован энергетический критерий разрушения для слоистых ПКМ Мизеса – Хилла, который в настоящее время получил наибольшее распространение [14].

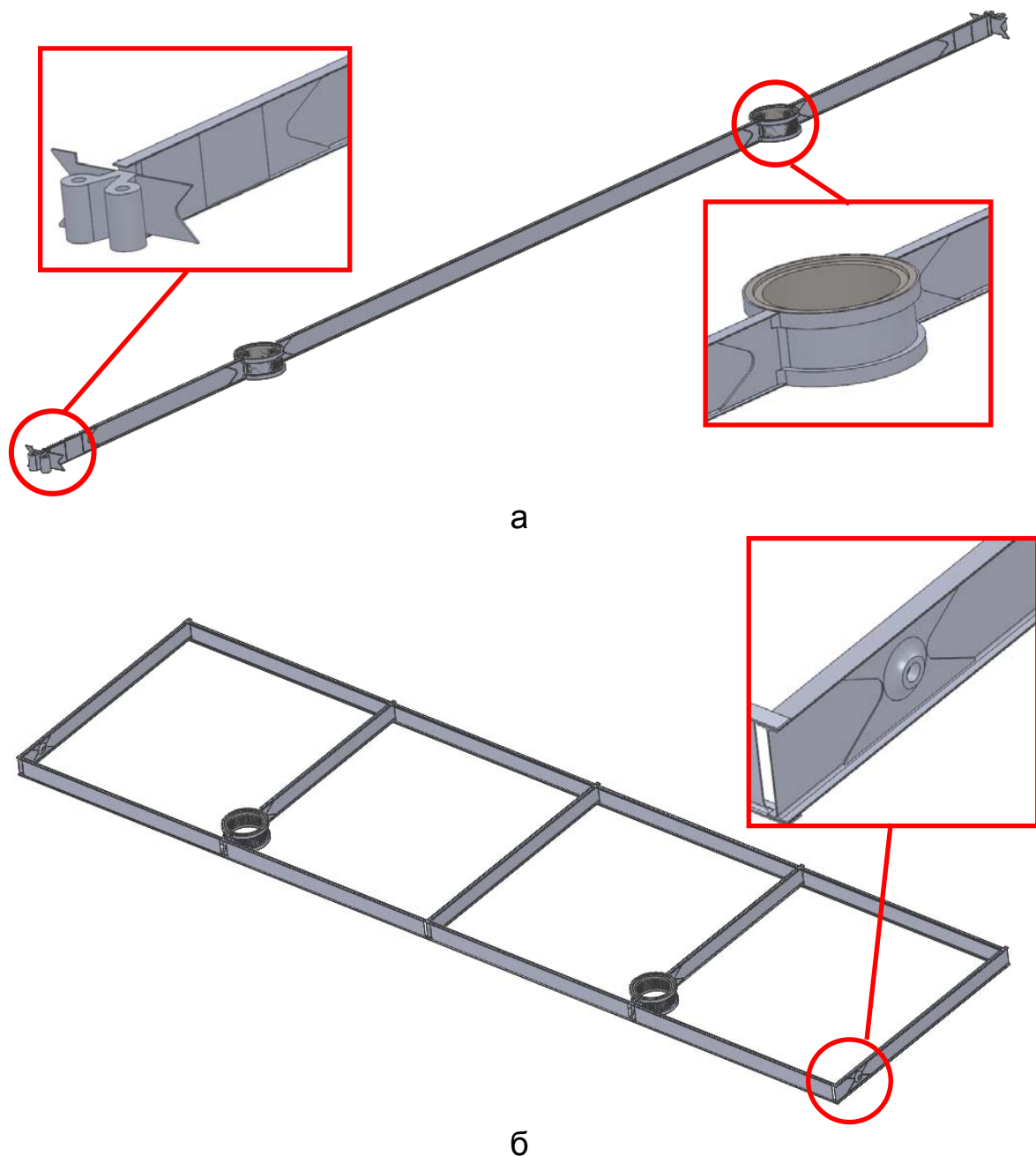


Рисунок 4 – Вычлененные для расчетов локального напряженного состояния изолированные элементы КСС панели СБ:  
 а – продольная балка для первой и третьей схем ПСИ;  
 б – фрагмент несущей рамы для второй схемы ПСИ

Для определения НДС элементов КСС панели СБ был использован один из программных комплексов конечно-элементного анализа. Неоспоримым преимуществом такого подхода является возможность исключения ряда погрешностей при определении НДС, присущих или связанных с использованием аналитических моделей, их высокая точность и полнота рассчитанных картин НДС, позволяющих более тщательно проанализировать особенности работы основных элементов конструкции, а также выявить потенциально опасные зоны [15, 16].

Для расчета рассматриваемые элементы КСС были представлены в виде системы пластин и оболочек. Для моделирования закладных элементов под установку замков зачековки и вилок для установки шарнирного узла был использован многослойный пластинчатый конечный элемент с заданной структурой, схемой и толщиной обмоточного композита и титановых втулок. Сгенерированная конечно-элементная модель продольной балки в районе замка зачековки и вилки для установки шарнирного узла показана на рис. 5. Разным цветом указаны зоны с различными схемами и структурой композита.

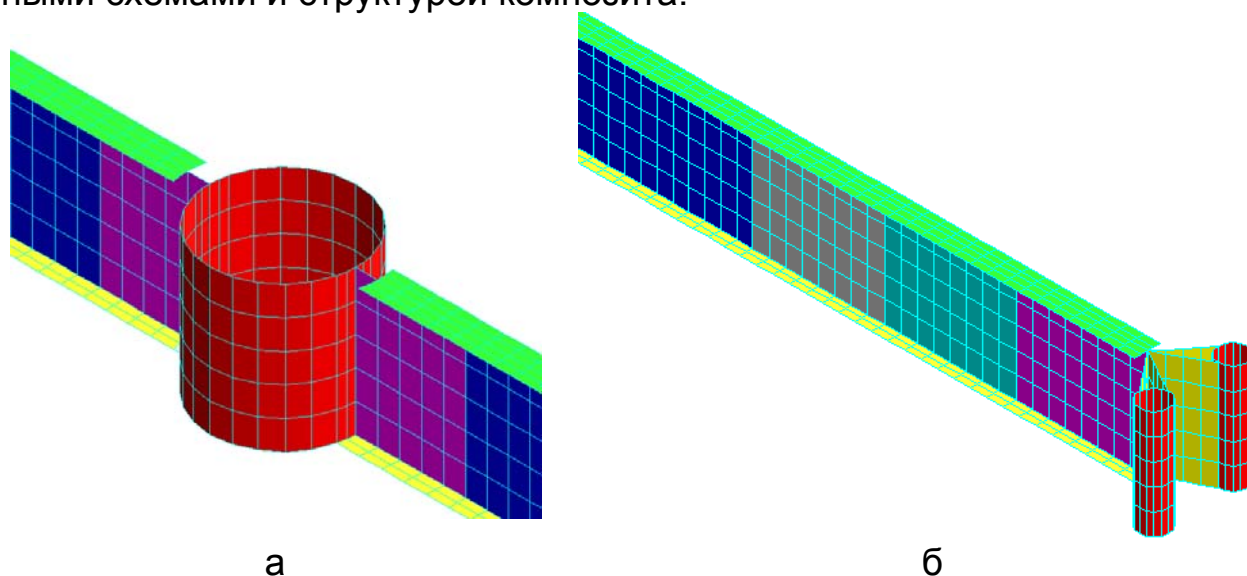
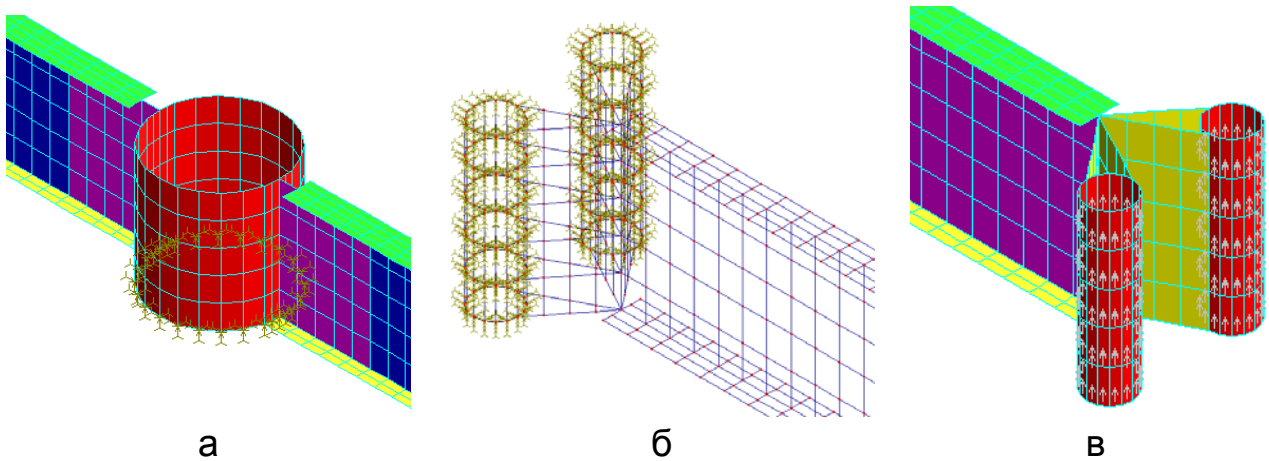


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель продольной балки:  
а – зона усиления в районе замка зачековки; б – зона усиления в районе вилки для установки шарнирного узла

Сгенерированная конечно-элементная модель продольной балки представлена 7000 элементами.

Принятые граничные условия, соответствующие первой и третьей схемам ПСИ, показаны на рис. 6. Для первой схемы ПСИ шарнирное опирание в замках зачековки моделировалось в виде закрепления на все линейные перемещения нижнего торца узла зачековки (рис. 6, а). Для третьей схемы ПСИ модель закреплялась на все перемещения по поверхности вилки для установки шарнирного узла с одного края (рис. 6, б). Для первой и третьей схем ПСИ нагрузка к вилкам установки шарнирного узла прикладывалась к ушкам вилки в виде давления на поверхности втулки шарнирного узла (рис. 6, в). Направление нагрузки изменялось в соответствии со знаком ее величины.

Полученные в результате расчетов картины распределения максимального индекса разрушения Мизеса – Хилла для изолированной продольной балки при действии на нее статических изгибающих нагрузок первой и третьей схем ПСИ показаны на рис. 7, 8.



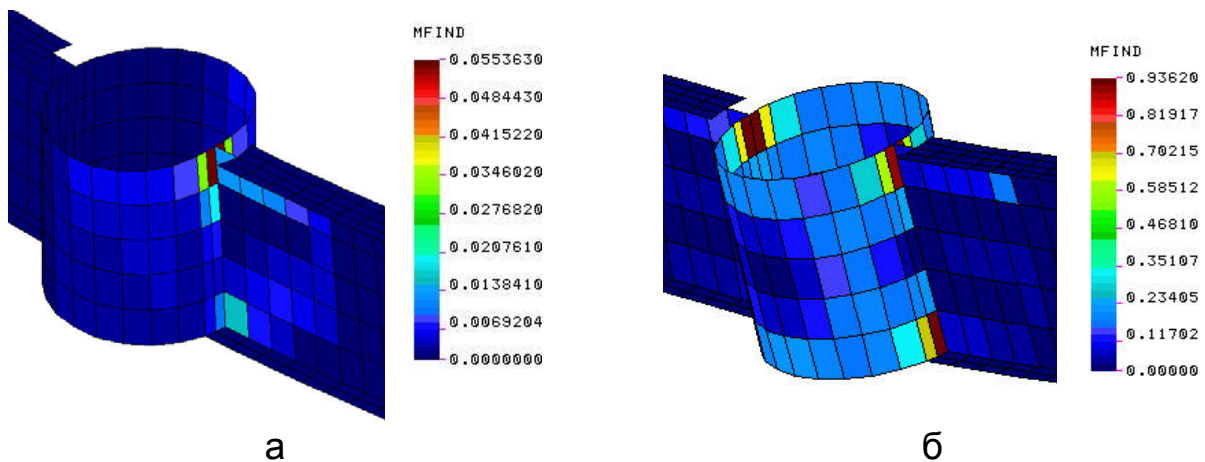
а

б

в

Рисунок 6 – Принятые граничные условия для продольной балки, соответствующие первой и третьей схемам ПСИ:

а – моделирование шарнирного опирания в районе замка зачековки;  
 б – моделирование условий закреплений в районе вилки для установки шарнирного узла;  
 в – моделирование нагружения продольной балки в районе вилки для установки шарнирного узла (+P)



а

б

Рисунок 7 – Картина распределения максимального индекса разрушения Мизеса – Хилла в районе узла зачековки при первой (а) и третьей (б) схемах нагружения ПСИ (+P)

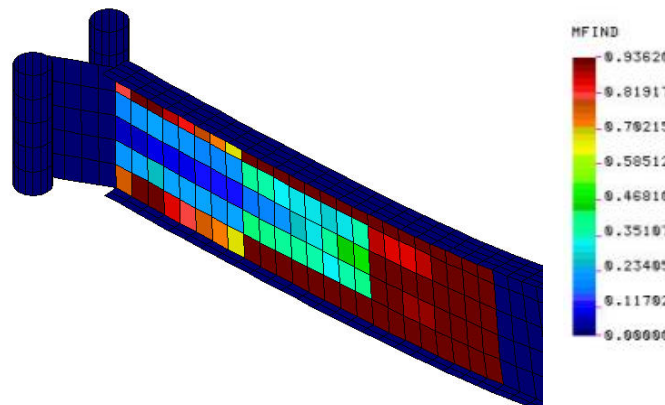


Рисунок 8 – Картина распределения максимального индекса Мизеса – Хилла в зоне усиления в районе вилки для установки шарнирного узла при третьей схеме нагружения ПСИ (+P)

Для дискретизации фрагмента несущей рамы, включающего в себя части двух поперечных и пяти продольных балок, два замка зачековки и две накладки, использован, как и ранее, многослойный оболочечный конечный элемент с заданной структурой, схемой и толщиной обмоточного композита и титановых втулок. Конечно-элементная модель фрагмента несущей рамы, представленная 15000 элементами, показана на рис. 9.

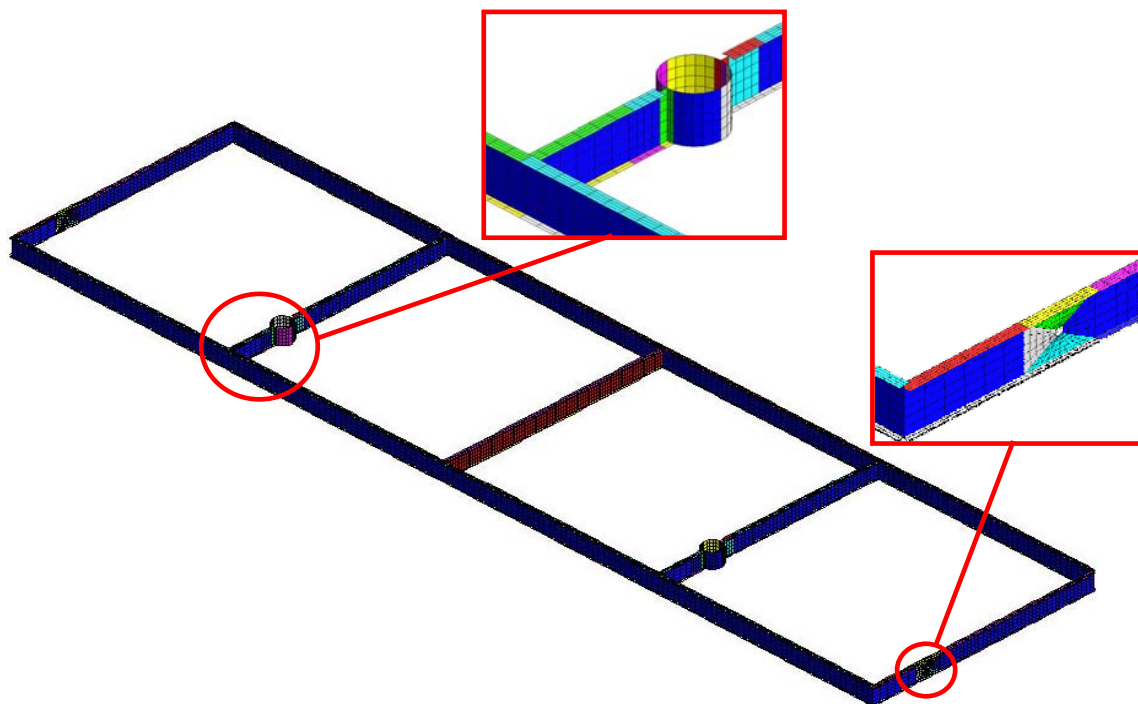


Рисунок 9 – Сгенерированная конечно-элементная модель фрагмента несущей рамы, включающего в себя части двух поперечных и пяти продольных балок, два замка зачековки и две накладки

Принятые граничные условия, соответствующие второй схеме ПСИ, показаны на рис. 10. Шарнирное опирание в замках зачековки фрагмента моделировалось в виде закрепления на все линейные перемещения нижнего торца узла зачековки (рис. 10, а), а нагружение моделировалось приложением распределенной по линии нагрузки, равной заданной (рис. 10, б).

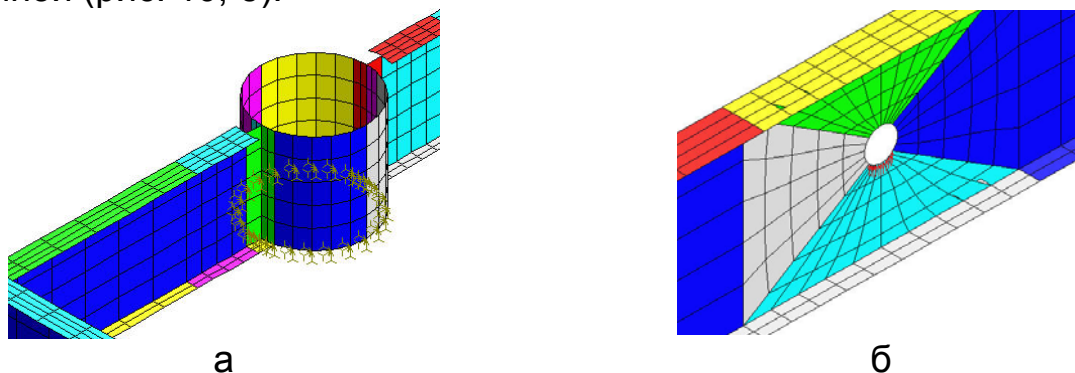


Рисунок 10 – Принятые граничные условия для фрагмента несущей рамы, соответствующие второй схеме ПСИ:  
а – моделирование шарнирного опирания в районе замка зачековки;  
б – моделирование нагружения в районе накладки (+P)

Результаты расчета для фрагмента несущей рамы панели СБ при действии на нее статических изгибающих нагрузок второй схемы ПСИ показаны на рис. 11.

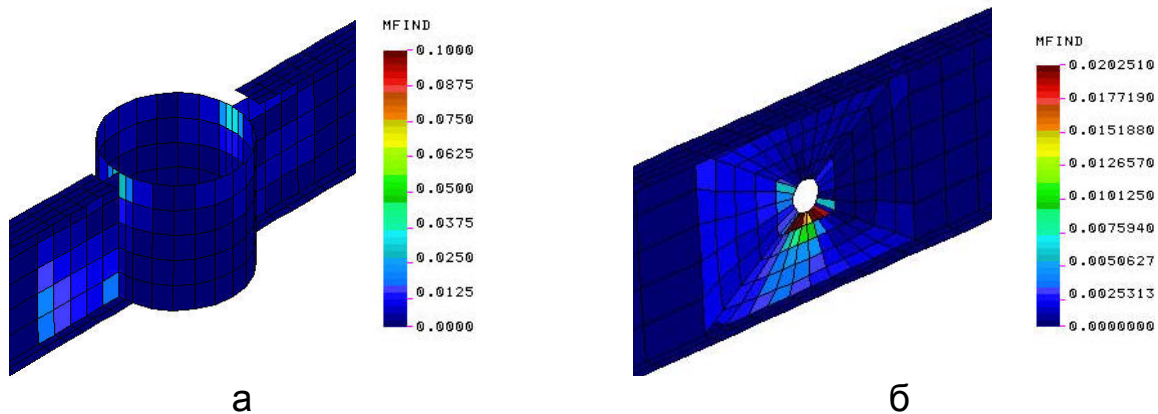


Рисунок 11 – Картина распределения максимального индекса разрушения Мизеса – Хилла в районе узла зачековки (а) и накладки (б) при второй схеме нагружения ПСИ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что более детальное моделирование локальных зон КСС панели СБ и соответствующих им зон усиления позволило существенно снизить модельную концентрацию напряжений и, как следствие, подтвердить обеспечение прочности в этих зонах.

Анализ существующих рамных конструкций, состоящих из системы продольных и поперечных балок, показал, что характерным критичным видом исчерпания их несущей способности является устойчивость [17]. Поэтому для оценки возможной потери устойчивости элементов несущей рамы панели СБ были вычислены некоторые формы (моды), соответствующие минимальным критическим нагрузкам. На рис. 12 показаны деформированные состояния продольных и поперечных балок несущей рамы панели СБ, соответствующие некоторым найденным формам (модам) потери устойчивости.

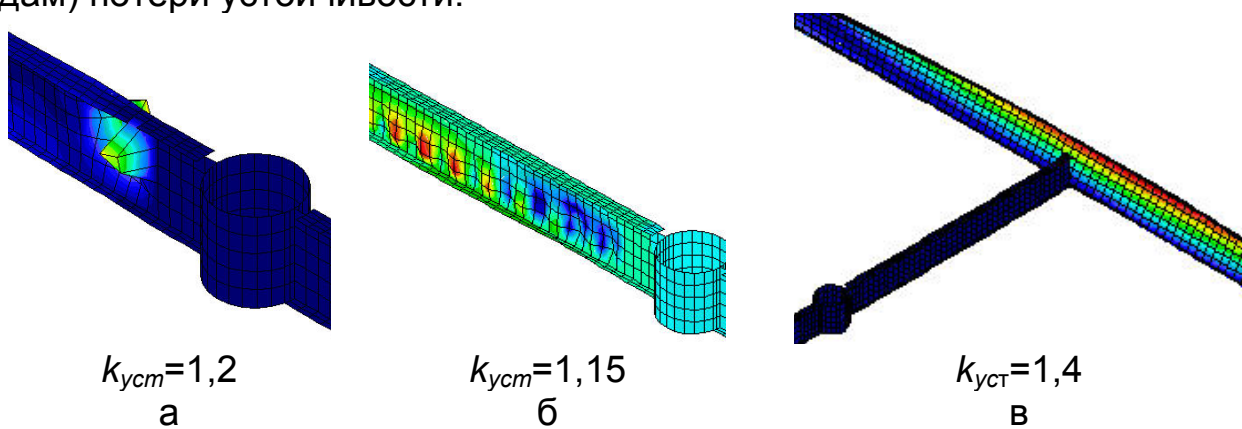


Рисунок 12 – Найденные формы потери устойчивости изолированной продольной балки при действии на нее статических изгибающих нагрузок первой (а), третьей (б) схем ПСИ и фрагмента несущей рамы при действии на нее статических изгибающих нагрузок второй схемы ПСИ (в)



Полученные результаты свидетельствуют о том, что потеря устойчивости рассматриваемых элементов КСС панели СБ, как и прогнозировалось, не происходит.

Приведенный выше детальный анализ напряженного состояния потенциально опасных зон КСС панели СБ в рамках принятых допущений свидетельствует о достаточной прочности и устойчивости, что дает основание на подтверждение обеспечения несущей способности панели СБ предложенной КСС. Однако интенсивность напряжений, а соответственно и величина принятого индекса разрушения для продольной балки, а также интегрированных в нее узлов зачековки и вилок для установки шарнирных узлов, являются предельно допустимыми при действии статических изгибающих нагрузок третьей схемы ПСИ. Точная оценка несущей способности такой интегральной КСС балки является в настоящее время сложной малоизученной задачей, требующей привлечения существенных вычислительных и временных затрат. Это вызвано разнообразием физических явлений, протекающих как непосредственно в ее конструктивных элементах, так и в зонах промежуточного переходного соединения углепластика с титановыми втулками. Проблема разработки эффективных конструктивно-технологических решений для таких зон, а также точное математическое моделирование взаимодействия отдельных элементов таких соединений находятся только на начальном этапе решения [18].

Для анализа совместной работы продольной балки с интегрированными в нее узлами зачековки и вилками для установки шарнирных узлов была сгенерирована пространственная (объемная) конечно-элементная модель. Для моделирования использовались 10-узловые тетраэдральные конечные элементы высокого порядка аппроксимации перемещений, что обеспечило высокую точность моделирования, особенно в зонах с большим градиентом компонентов НДС. На рис. 13 показана конечно-элементная модель продольной балки несущей панели СБ с интегрированными в нее узлами зачековки и вилками для установки шарнирных узлов. Модель представлена 50000 элементами.

Принято, что различные элементы продольной балки с интегрированными в нее узлами зачековки и вилками для установки шарнирных узлов (на рис. 13 показаны различными цветами) имеют ортотропные характеристики, соответствующие заданной структуре и схеме армирования конкретной локальной зоны усиления. Аналитическое определение величин этих приведенных констант проведено на базе известных зависимостей теории армирования [19].

Граничные условия для данной модели были заданы аналогично проведенному выше моделированию локального напряженного состояния изолированной продольной балки.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

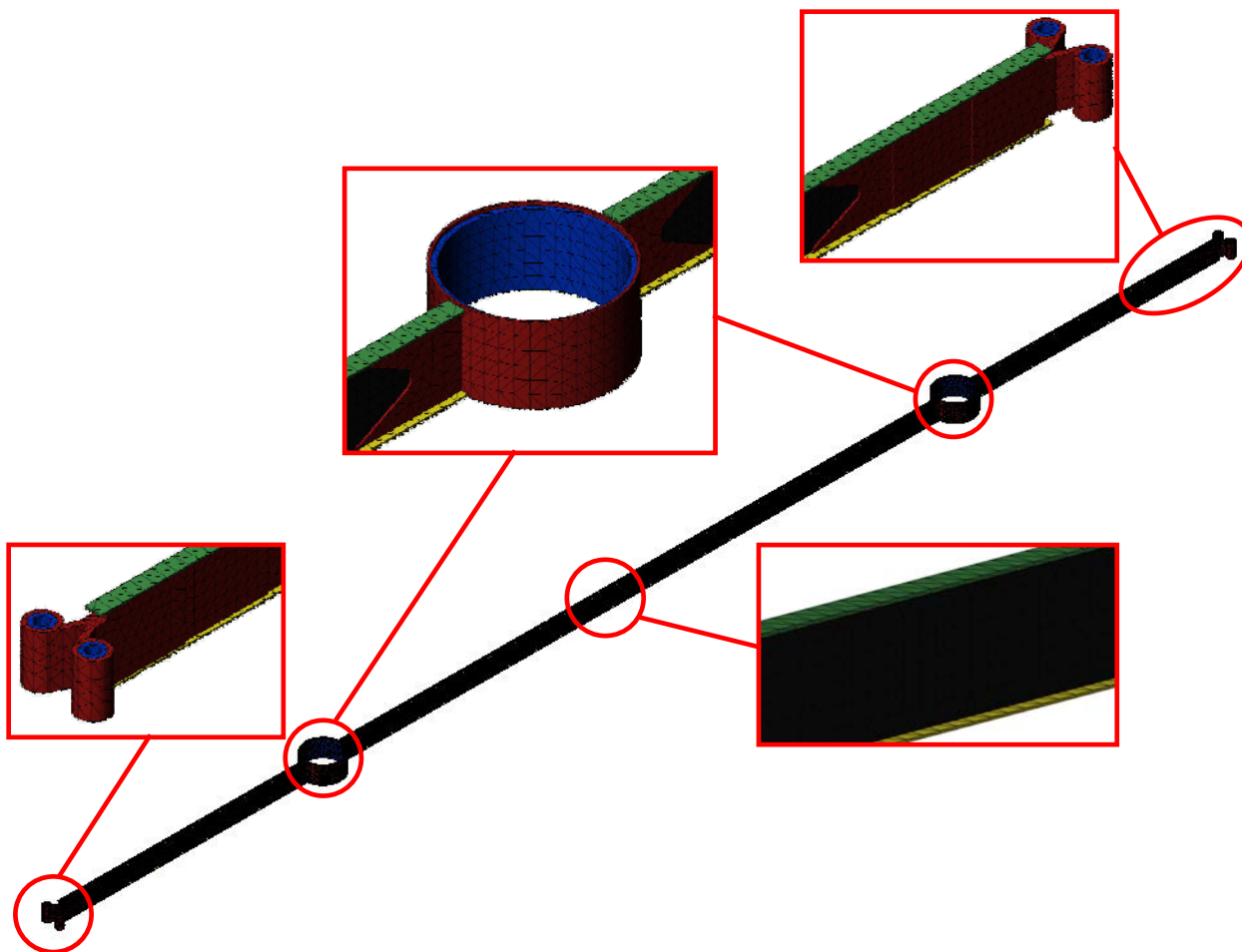


Рисунок 13 – Конечно-элементная модель, сгенерированная для анализа совместной работы продольной балки с интегрированными в нее узлами зачековки и вилками для установки шарнирных узлов

На рис. 14 показан пример полученной в результате расчета картины распределения касательных напряжений в плоскости композита (в материальной системе координат) в зоне установки вилки.

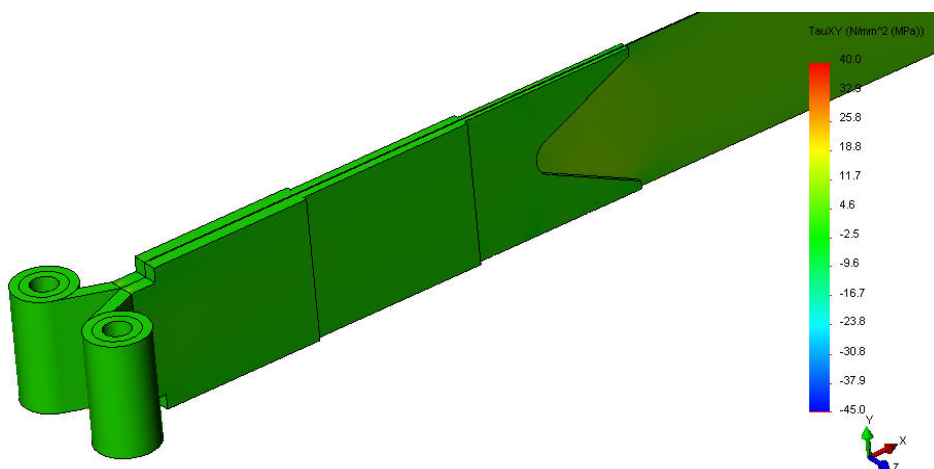


Рисунок 14 – Картина распределения касательных напряжений в плоскости композита (в материальной системе координат) в зоне установки вилки

Таблица 2 – Результаты расчета модели, сгенерированной для анализа совместной работы продольной балки с интегрированными в нее узлами зачековки и вилками для установки шарнирных узлов

| Элемент модели                         | Максимальные действующие в материальной системе координат напряжения |     |                  |     |                   |      | Максимальное значение критерия Мизеса – Хилла |
|--|--|-----|------------------|-----|-------------------|------|---|
|  | $\sigma_x$ , МПа   |     | $\sigma_y$ , МПа |     | $\tau_{xy}$ , МПа |      |   |
| Схема 3 (+P)                           |  |     |                  |     |                   |      |   |
| Верхний пояс                           | -295   | 10  | -15              | 2   | -10               | 21   | 0,33  |
| Нижний пояс                            | -6   | 501 | -1               | 31  | -27               | 21   | 0,97  |
| Стенки                                 | -133   | 141 | -130             | 164 | -45               | 40   | 0,96  |
| Зона усиления в районе вилки           | -84  | 85  | -36              | 34  | -24               | 24   | 0,98  |
| Зона усиления в районе замка зачековки | -344   | 345 | -18              | 30  | -14               | 30   | 0,88  |
| Схема 3 (-P)                           |  |     |                  |     |                   |      |   |
| Верхний пояс                           | -10  | 295 | -2               | 15  | -21               | 10   | 0,33  |
| Нижний пояс                            | -501   | 6   | -31              | 1   | -21               | 27   | 0,97  |
| Стенки                                 | -141   | 133 | -164             | 130 | -40               | 45   | 0,96  |
| Зона усиления в районе вилки           | -85  | 84  | -34              | 36  | -24               | 24,2 | 0,98  |
| Зона усиления в районе замка зачековки | -345   | 344 | -30              | 18  | -30               | 14   | 0,88  |

Проведенный анализ несущей способности продольной балки с интегрированными в нее узлами зачековки и вилками для установки шарнирных узлов по двум теориям прочности (максимальных нормальных напряжений и энергетической Мизеса – Хилла) свидетельствует о том, что она обеспечивается с достаточным запасом.

### Выводы

1. Сформулированы математические модели наиболее нагруженных элементов разработанной КСС панели СБ космического назначения с линейными концентраторами на основе линз Френеля, определено и исследовано напряженное состояние в районе замков зачековки и вилок для установки шарнирных узлов, а также в локальных зонах их усиления.

2. Проведенный подробный анализ напряженного состояния рассматриваемых локальных зон КСС в рамках принятых допущений подтвердил обеспечение их несущей способности с достаточным запасом.

### Список использованных источников

1. Научно-технические аспекты разработки, изготовления и эксплуатации систем электроснабжения космических аппаратов [Текст] / К.В. Безручко, В.Н. Борщов, А.О. Давидов и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 5(82). – С. 8 – 13.
2. Методика оптимального проектирования облегченных конструкций солнечных батарей [Текст] / А.В. Гайдачук, В.В. Кириченко, В.И. Сливинский и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*: тр. ХАИ за 1997 г. – X., 1998. – С. 212 – 217.
3. Расчетные исследования каркасов панелей солнечных батарей космического аппарата [Текст] / В.Н. Борщев, В.А. Антонова, А.М. Листратенко и др. // *Вестник ХПИ*. – 2005. – № 47. – С. 21 – 29.
4. Лопатин, А.В. Модель анизотридного композитного сетчатого каркаса солнечной батареи космического аппарата [Текст] / А.В. Лопатин, В.А. Нестеров, Л.В. Шумкова // *Решетневские чтения: сб. материалов XIV междунар. науч. конф. Красноярск 10–12 нояб. 2010 г. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. – Красноярск, 2010. – Ч. 1. – С. 70 – 71.*
5. О некоторых особенностях снижения массы трехслойных сотовых каркасов для панелей солнечных батарей [Текст] / А.В. Дегтярев, В.А. Коваленко, А.В. Потапов, Ю.В.Штефан // *Вестн. Восточноукр. нац. ун-та им. В. Даля*. – 2012. – № 8 (179). – С. 30 – 35.
6. Анализ схем армирования несущих слоев и рационального распределения материала в композитной панели солнечной батареи с сотовым наполнителем [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, В.И. Сливинский, В.А. Коваленко, В.И. Кузоро // *Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф., Днепрпетровск 01 – 03 июня 2011 г. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепрпетровск, 2011. – С. 98 – 111.*
7. Модель сетчатой конструктивно-силовой схемы каркаса тестовой панели солнечной батареи космического аппарата [Текст] / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, М.А. Шевцова, И.Г. Гагауз // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 58. – X, 2013. – С.89 – 97.
8. Eskenasi, M. The Cell Saver Concentrator for Spacecraft Solar Arrays [Текст] / M. Eskenasi, J. Ballinger // *17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, 22-26 October – 2001*– P. 2292 – 2295.
9. Современное состояние и перспективы развития солнечных батарей для энергоснабжения космических аппаратов [Текст] / Н.В. Замирец, В.Н. Борщов, О.Н. Замирец и др. // *Технология приборостроения*. – 2010. – № 2. – С 7 – 13.
10. Пат. на винахід 105952 UA, МПК H01L 31/052, F24J 2/08 Сонячний концентраторний короткофокусний модуль / В.М. Борщов, О.М. Лістратенко, Я.Я. Костишин, В.В. Гаврилко, О.М. Зинов'єв, О.П. Кузнецов, М.О. Трайдук, О.М. Потапов, В.О. Коваленко; Заявитель и патентообладатель Товариство з обмеженою відповідальністю науково-виробнича фірма

«Дніпротехсервіс». - № а 2012 11721; заявл. 10.10.12; опубл. 10.07.14, Бюл. 13. – 13 с.

11. Разработка макетного образца и технологии изготовления тестовой панели солнечной батареи космического аппарата [Текст] / В.В. Гаврилко, В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, А.М. Потапов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(71). – Х., 2012. – С. 110 – 117.

12. Выбор рациональных параметров элементов конструктивно-силовой схемы каркаса тестовой панели солнечной батареи космического аппарата [Текст] / В.В. Гаврилко, В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, А.М. Потапов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 54. – Х, 2012. – С. 5 – 13.

13. Оценка напряженно-деформированного состояния композитной панели концентраторной солнечной батареи космического назначения при различных случаях нагружения [Текст] / А.М. Зиновьев, В.В. Гаврилко, А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко, А.П. Кузнецов, А.А. Царицынский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 4(111). – С. 4 – 7.

14. Композиционные материалы [Текст]: справ. / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; под ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

15. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники [Текст]: моногр. / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.В. Кириченко, В.И. Сливинский. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 172 с.

16. Полиновский, В.П. Применение программных продуктов фирмы MSC. Software для расчета новых изделий из композиционных материалов в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева [Электронный ресурс.] / В.П. Полиновский // тр. Рос. конф. пользователей систем MSC 2003 г. – М.: MSC.Software Corporation. – 5 с. Режим доступа: [http://www.mscsoftware.ru/document/conf/Moscow\\_conf/conf\\_2003/khrun.zip](http://www.mscsoftware.ru/document/conf/Moscow_conf/conf_2003/khrun.zip). – Загл. с экрана.

17. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем [Текст] / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

18. Карпов, Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст]: моногр. / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2006. – 359 с.

19. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.

*Поступила в редакцию 22.01.2015.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*