

## ОТЗЫВ

### официального оппонента на диссертационную работу Хмельницкого Ярослава Анатольевича

«Конструкторско-технологическая разработка изготовления типового ультралёгкого каркаса панелей солнечных батарей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

#### **Актуальность темы диссертационной работы.**

Солнечные батареи (СБ) прочно зарекомендовали себя как надежные и перспективные составные части системы энергоснабжения космических аппаратов. С развитием возможностей и усложнением целевых задач, в современных космических проектах сформировалась устойчивая тенденция увеличения располагаемой мощности солнечных электростанций, что приводит к необходимости увеличения площади панелей СБ. При этом проблемы минимизации массовых характеристик и увеличения ресурса работы в условиях факторов космического пространства становятся сегодня ещё более актуальными.

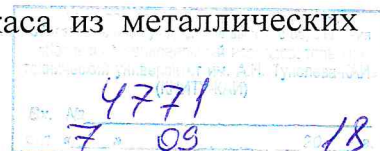
Автор посвятил работу решению комплекса задач создания оригинальной интегральной конструкции ультралёгкого каркаса из высокомодульного углепластика, что позволит повысить техническую эффективность солнечных батарей перспективных космических аппаратов.

#### **Содержание работы и научная новизна полученных результатов.**

Конструкции каркасов солнечных батарей должны обладать высокой геометрической стабильностью, жесткостью и иметь минимальную массу, что необходимо для взаимного относительного фиксирования фотоэлектрических элементов с максимальной плотностью укладки, с целью увеличения удельных характеристик и надежности солнечной батареи.

Автором достаточно подробно проведен анализ существующих конструкций панелей солнечных батарей КА с оценкой их преимуществ и недостатков. Участвуя в создании различных вариантов каркасов панелей солнечных батарей для предприятий Роскосмоса, автор проводит их сравнительные оценки и убедительно приходит к выводу о перспективности применения полимерных композиционных материалов, которые благодаря высоким коэффициентам удельной прочности и жесткости, низкому коэффициенту линейного расширения, позволяют получать конструкции панелей СБ с меньшими массовыми характеристиками.

Широкое распространение в космических проектах в мировой практике получили панели солнечных батарей, состоящие из каркаса из металлических



или углепластиковых труб, на которые натягивается сетеполотно или струны, а также в виде трёхслойных конструкций, состоящих из двух обшивок и расположенного между ними сотового заполнителя.

Опираясь на технологические возможности ОНПП «Технология», автор предложил оригинальную интегральную конструкцию ультралёгкого каркаса панелей солнечных батарей из высокомодульных углепластиков.

Создание ультралёгкой конструкции каркаса солнечных батарей потребовало замены алюминиевых сплавов на углепластиковые композиционные материалы. В работе проведены многочисленные испытания композиционных материалов различных производителей и определено, что наиболее эффективными являются композиционные углепластиковые материалы на основе ПАН-волокон. Наряду с композиционными материалами испытывались клеевые пленки и компаунды. Эти экспериментальные исследования имеют практическое значение, так как определяют углепластики и полимерные компаунды, необходимые для создания облегченных конструкций каркасов панелей солнечных батарей.

Анализ весовых характеристик и прочностных свойств панелей определил выбор конструктивной схемы каркаса панелей солнечных батарей в виде трехслойных конструкций из углепластика, в котором наполнителем является углеродный жгут. Дальнейшее исследование конструкций каркасов панелей связано с заменой сотового заполнителя каркасным наполнителем из плоских углепластиковых элементов, в продольном и поперечном направлениях и образующих замкнутые ячейки прямоугольной, квадратной и треугольной формы.

Применительно к интегральным панелям исследуются два типа каркасов панелей солнечных батарей из композиционных углепластиковых материалов с различной толщиной тканного наполнителя.

Дальнейшее совершенствование конструкции каркасов солнечных батарей связано с облегчением углепластиковых обшивок путем вырезания в них окон над ячейками каркасного заполнителя из пластин. Окна соответствуют размерам ячеек каркасного заполнителя: 5x5 мм, 15x15 мм 30x30 мм.

Конструкции каркасов панелей содержат узлы навески, обеспечивающие раскрытие солнечной батареи и переход батареи в рабочее положение при выходе космического аппарата на орбиту. Основным элементом узлов навески являются втулки, скрепленные с каркасом панелей солнечной батареи. Крепление этих втулок и нагрузки, которые могут выдержать крепления, определялись экспериментальным путем.

Проводились эксперименты, связанные с вырывом втулок из панелей, сдвигом их в плоскости панелей и с определением крутящего момента при кручении втулок. Эти эксперименты позволили разработать надежные крепления втулок с панелью. Удалось добиться того, что отслоение клеевых пленок происходило одновременно с разрушением крепления, что обеспечивало большую разрушающую нагрузку. Конструкции каркасов панелей с углепластиковыми обшивками и сотозаполнителем, с углепластиковыми обшивками и каркасным заполнителем, конструкции с обшивками с вырезанными окнами и каркасным заполнителем рассчитывались на прочность при нагружении в плоскости панели и при нагружении перпендикулярно панели. Определялись напряжения, деформации и перемещения, а также находились частоты и формы собственных колебаний этих панелей. Эти расчеты показали, что напряженно-деформированное состояние облегченных интегральных панелей находится на допустимом уровне и не превышает напряжений, возникающих в других более массивных панелях.

Наряду с прочностными расчетами определялись частоты и формы собственных колебаний солнечных батарей, декременты и время затухания колебаний космического аппарата при его маневрировании.

Технологический процесс изготовления интегрального каркаса солнечных батарей представлен шестью технологическими операциями изготовления элементов этой интегральной конструкции, рекомендациями по выбору углепластиковых полимерных композиционных материалов, клеев и компаундов, а также требованиями к технологической оснастке.

Достоинством диссертационной работы является комплексное решение поставленной задачи. Автор сумел удачно совместить технологические возможности и наработки современного производства по изготовлению изделий из композиционных материалов с задачами создания перспективных конструкций с уникальными удельными весовыми характеристиками, что сегодня весьма востребовано в космической отрасли.

### **Достоверность результатов.**

Результаты, полученные диссертантом, обоснованы и достоверны, так как опираются на экспериментальную оценку прочностных характеристик полимерных композиционных материалов, количественное определение весовых характеристик различных вариантов конструкций, в том числе и ультралегкого типового каркаса панелей солнечных батарей, расчеты и экспериментальные данные по прочностным и динамическим характеристикам панелей, а также исходя из результатов испытаний на воздействие факторов космического

пространства, включая и орбитальные испытания космического аппарата «Аист-2Д, созданного Ракетно-космическим центром «Прогресс».

### **Научная и практическая ценность работы.**

Научная ценность работы заключается в том, что выполнена конструкторско-технологическая разработка изготовления предложенных интегральных ультралёгких конструкций каркасов солнечных батарей для космических аппаратов, обладающих высокой весовой отдачей и большой жесткостью. Для этих интегральных конструкций разработан технологический процесс, определяющий структуру и содержание операций. Научная новизна заключается также в том, что выбрана схема расчета, методики и оптимальные программы для определения напряженно-деформированного состояния и частотных характеристик каркасов панелей солнечных батарей. Практическая ценность заключается в том, что разработанная интегральная конструкция солнечных батарей является типовой и служит основой для проектирования интегральных конструкций солнечных батарей для различных космических аппаратов. Это позволяет повысить технические характеристики солнечных батарей и создает экономический эффект при разработке и изготовлении солнечных батарей космических аппаратов.

### **Структура диссертации.**

Работа состоит из введения, 5-ти глав, заключения, приложения и списка литературы из 133 наименований. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 123 рисунка, 19 таблиц.

### **Замечания по работе.**

1. При определении напряженно-деформированного состояния панелей, нагрузка, перпендикулярная плоскости панелей в виде ударного воздействия, принималась с перегрузкой 40g. Однако воздействие этой нагрузки в работе считается эквивалентным воздействию статической нагрузки 60g. В работе отсутствует обоснование такого подхода.

2. Одним из ключевых моментов решения проблемы минимизации массовых характеристик и повышения жесткостных характеристик панелей СБ, является оптимизация конструктивно-технологических решений в зоне узлов навески и соединения с сочленяемыми каркасами. Автор решил эти вопросы традиционными методами – применением закладных втулок, предполагая выполнение разработки конструкции узлов сочленения и зачекочки

разработчиком космического аппарата КА, хотя интеграция силовых интерфейсных элементов со структурой каркаса могла бы стать перспективным вариантом.

3. Таблица 2.1, поясняющая преимущество углепластика по сравнению с алюминием неубедительна, поскольку современные алюминиевые сплавы имеют вдвое выше показанного предел прочности. Таблицы 2.2 и 2.3 следовало бы привести к одним сравнительным критериям и к одинаковым размерностям, что значительно подкрепило бы выводы по главе 2.

4. Недостаточно убедительно обоснованы выводы по уменьшению трудоёмкости изготовления интегральных панелей солнечных батарей.

Отмеченные замечания, существенно не влияют на высокий научный уровень выполненной работы.

#### **Оценка в целом.**

Выполненная работа представляет законченное научное исследование, в котором решены важные научные и практические вопросы, касающиеся совершенствования конструкции и технологии солнечных батарей космических аппаратов. Автореферат и опубликованные материалы отражают содержание диссертации. Диссертационная работа соответствует специальности 05.07.02. – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов. Материал в работе изложен в логической последовательности и написан хорошим техническим языком. Диссертация «Конструкторско-технологическая разработка изготовления типового ультралёгкого каркаса панелей солнечных батарей» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Ярослав Анатольевич Хмельницкий заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов.

Официальный оппонент  
ведущий конструктор  
АО «НПО Лавочкина», к.т.н.,  
профессор

Моишеев А.А.

Подпись оппонента Моишеева А.А. заверяю:  
Начальник отдела персонала



Перевозчиков Н.П.