

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора, начальника управления научной деятельностью ФАУ «ЦАГИ» Ковалева Игоря Евгеньевича на диссертацию Склезнева Андрея Анатольевича «Проектирование, конструкция и изготовление металлокомпозитных криогенных топливных баков для ракетно-космической техники», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.13. – «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Композитные материалы, обладающие высокими удельными прочностью и жёсткостью и используемые в конструкциях летательных аппаратов и космической техники, тем не менее, ещё недостаточно широко используются в конструкциях ракет-носителей на жидком топливе.

Актуальность темы исследования определяется разработанной новой конструктивно-силовой схемой криогенных баков ракет-носителей на жидком топливе с использованием металлокомпозитных ёмкостей и несущих силовых сетчатых конструкций, выполненных из однонаправленных армированных полимерных композитов. Такая конструкция позволяет существенно (до 30%) повысить весовое совершенство топливных баков по сравнению с металлическими вафельными структурами, что значительно повышает эффективность изделий ракетно-космической техники.

Вместе с тем, стоит отметить, что подобных решений практически не имеется в настоящий момент и необходимость разработки методик проектирования и расчёта металлокомпозитных криогенных несущих баков, создания технологии их изготовления из композитных материалов и их экспериментальная отработка определяют **актуальность** данного исследования – перечисленные работы составляют цель диссертации.

Содержание и анализ диссертационной работы

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 200 наименований. Объём диссертации составляет 322 страницы машинописного текста.

Во **введении** отражена актуальность работы, сформулированы и обоснованы цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна, методы исследования, теоретическая и практическая значимости работы, приводятся сведения о публикациях основных результатов диссертации в 39 научных работах, в том числе 12 научных статьях в рецензируемых изданиях

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«12» 09 2023.

из перечня ВАК, 2 статья из перечня Scopus, имеются патенты на изобретения, полезную модель и зарегистрированные программы для ЭВМ.

В первой главе («Применение композитов в силовых конструкциях ракетно-космической техники») представлен обзор работ в области разработки криогенных топливных баков, сетчатых (анизотридных) композитных конструкций, металлокомпозитных баллонов давления. В ней обсуждаются методы проектирования, особенности конструкции и технологии изготовления баков. Обзор представлен достаточно подробно, хорошо иллюстрирован конкретными образцами конструкций и демонстрирует свободное владение диссертантом предметной областью исследований. Глава завершается формулированием цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе («Проектирование металлокомпозитных криогенных топливных баков») проведена разработка методики проектирования криогенного металлокомпозитного топливного бака. Дополнительно разработана и представлена модифицированная методика проектирования металлических баков вафельной конструкции для сравнительной оценки весового совершенства рассматриваемых конструкций.

Проведено проектирование модельного криогенного металлокомпозитного бака диаметром 1 м и длиной цилиндрической части 1.5 м на действие криогенного рабочего тела под давлением 0.5 МПа и осевой эквивалентной сжимающей силы 3.92 МН. Для проектирования использованы характеристики отечественных материалов как в части армирующих систем, так и в части связующих. Проведён численный расчёт спроектированной конструкции на прочность и устойчивость при помощи метода конечных элементов, установлено, что спроектированный металлокомпозитный бак имеет до 30% более низкий вес по сравнению с алюминиевым баком вафельной конструкции аналогичных геометрических размеров.

Глава 3 («Технологические задачи изготовления металлокомпозитных криогенных топливных баков») содержит разработанную директивную технологию изготовления металлокомпозитных топливных баков с несущей стенкой из сетчатой структуры, а также посвящена решению нескольких технологических задач. В частности, решена задача устойчивости тонкостенного лайнера при намотке гибкой системы нитей – при помощи системы нелинейных уравнений теории цилиндрических оболочек получено универсальное выражение для критического натяжения, зависящего от

радиуса, изгибной жёсткости оболочки и параметра нагружения, определённого аналитически и экспериментально.

Также решена задача устойчивости лайнера при термообработке металлокомпозитной ёмкости. С использованием системы нелинейных уравнений теории цилиндрических оболочек получено уточнённое решение для критической деформации, которая возникает от воздействия перепада температур и значительной разнице коэффициентов температурного расширения материалов лайнера и силовой оболочки.

В главе оценено влияние формообразующего материала для изготовления сетчатой структуры на механические свойства стенки бака. В роли такого формообразующего ребра сетки материала выступает лёгкий конструкционный пенопласт в отличие от традиционных резиновых подложек. Приведены рекомендации по технологическим приёмам, которые могут привести к увеличению прочности рёбер сетчатой структуры.

В работе и главе проведены исследования по обеспечению технологической возможности внедрения в материал конструкции бака измерительных систем непрерывного действия на основе волоконно-оптических датчиков. Исследованы различные приёмы сохранения неповреждёнными выводов и коннекторов таких систем во время изготовления и механической обработки изделия.

Глава 4 («Задачи, связанные с эксплуатацией металлокомпозитных криогенных топливных баков») содержит анализ и решение эксплуатационных задач, которые возникают при эксплуатации криогенного металлокомпозитного топливного бака в составе ракетно-космической техники. При помощи разработанной Склезневым А.А. математической модели, описывающей поведение стенки бака при действии нагружения и при изменении температур в широком диапазоне, можно определять коэффициенты жёсткости функциональных слоёв и стенки в целом, прогибы и деформации слоёв, а также контактное давление, возникающее в процессе работы бака между функциональными слоями. Такое контактное давление может приводить к расслоению стенки или отслоению лайнера. В работе представлен анализ влияния на величину контактного взаимодействия локальных подкрепляющих или технологических шпангоутов, предложена новая конструкция шпангоута для снижения эффекта его влияния, а также проанализированы и опробованы на модельном баке способы компенсации отрывного контактного давления при помощи криогенного клея.

В главе рассмотрена ещё одна, третья по счёту, задача устойчивости тонкостенного лайнера, находящегося в жёсткой силовой композитной стенке, от действия эксплуатационных осевых сжимающих сил. Такие силы – типовые внешние воздействия на отсеки ракет и корпуса фюзеляжей летательных аппаратов. Приближённое решение задачи устойчивости получено с использованием метода Бубнова-Галёркина, автор получил простую формулу для оценки критической деформации потери устойчивости лайнера, зависящую только от его геометрических параметров.

Пятая глава («Изготовление и испытания металлокомпозитного криогенного топливного бака») описывает экспериментальную отработку модельного криогенного металлокомпозитного топливного бака. Модельный бак был спроектирован и изготовлен по разработанным в диссертационной работе методиками и технологии с учётом оценки и расчёта технологических параметров намотки и термообработки, обеспечивающих неповреждаемость и устойчивость металлического лайнера. В результате бак успешно выдержал плановые 10 циклов криостатических захолаживаний жидким азотом и был разрушен при нагружения сжимающей силой и изгибающим моментом в захолаженном состоянии с избыточным внутренним давлением 5 атмосфер осевой сжимающей эквивалентной силой лишь немного отличающейся от расчётной нагрузки. Особенностью разрушения является отсутствие разгерметизации бака при разрушении сетчатой силовой несущей стенки.

В процессе испытаний успешно доказали свою работоспособность волоконно-оптические измерительные системы, работавшие во всём диапазоне температур испытаний и не оказавшие влияния на механическую прочность объекта испытаний.

Экспериментальная отработка бака демонстрирует правильность проектных параметров, заложенных при изготовлении модельного бака и работоспособность как методов проектирования и расчёта, представленных в диссертации, так и промышленной технологии изготовления металлокомпозитного криогенного топливного бака.

В шестой главе («Проектирование натурального бака») представлены результаты использования разработанных методов проектирования и расчёта для определения оптимальных конструктивных параметров натурального полноразмерного криогенного металлокомпозитного топливного бака перспективной ракеты-носителя среднего класса. Диаметр такого бака 4.1 м, длина до 20 м. Результаты проектирования металлокомпозитного бака в

сравнении с результатами проектирования алюминиевого вафельного бака подтверждают возможность проектирования бака с выигрышем по весу более

Разработанные программные средства для расчёта технологических параметров изготовления металлокомпозитных ёмкостей и баков с несущей силовой стенкой методом автоматизированной намотки позволяют значительно сократить трудоёмкость отработки новых конструкций.

Заключение содержит выводы по результатам исследования по диссертационной работе. Диссертация написана строгим научным языком, содержание её глав логически взаимосвязано и в полной мере раскрывает методы и алгоритмы решённых задач.

Научная новизна исследований

Научная новизна диссертационной работы Склезнева А.А. заключается в следующем:

- 1 Разработана новая конструктивно-силовая схема криогенного металлокомпозитного топливного бака с силовой стенкой на основе сетчатых структур, апробирована методика проектирования и технология изготовления бака, проведены экспериментальные исследования, подтверждающие проектные расчёты.
- 2 Решён ряд технологических и эксплуатационных задач устойчивости металлического лайнера при намотке композитного материала с натяжением, устойчивости лайнера при температурной обработке, устойчивости лайнера при осевом сжатии бака.
- 3 В работе представлена модель несущей стенки бака, пригодная для расчёта эффективных коэффициентов жёсткости, прогибов и контактных давлений между слоями стенки, определения теплопроводности стенки бака по толщине.
- 4 Проведён анализ совместной работы разнородных материалов – металлического лайнера и силовой композитной оболочки с сетчатой структурой, исследовано влияние локальных подкрепляющих лайнер элементов – шпангоутов, – на контактное взаимодействие на границе лайнер-композит. Предложена модифицированная конструкция шпангоута.

Степень обоснованности и достоверность результатов диссертации подтверждается сравнением теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований, а также применением апробированных

аналитических и численных методов расчёта с широким использованием метода конечных элементов.

Основные положения, структура, выводы и результаты, изложенные в автореферате, соответствуют материалам диссертационной работы. Публикации отражают содержание работы.

Теоретическая значимость

Полученные автором в диссертации результаты являются развитием методов проектирования металлокомпозитных конструкций и могут быть применены для летательных аппаратов, в частности для гражданских самолётов на криогенном топливе.

Практическая значимость

Полученные результаты могут применяться для определения технологических параметров изготовления металлокомпозитных ёмкостей, позволяя значительно сократить время технологической подготовки производства и отработки новых изделий.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты работы Склезнева А.А. могут быть рекомендованы для изучения и внедрения в научных и образовательных организациях, на предприятиях космической и авиационной промышленности.

Замечания по диссертационной работе:

1 При описании сетчатых структур в диссертации кроме спиральных и кольцевых рёбер упомянуты также и продольные рёбра, однако они отсутствуют в конструкции стенки криогенного бака.

2 В работе недостаточно раскрыта информация о контроле образцов-свидетелей композитного материала в части механических характеристик, а также о проведении дефектовки модельного бака после испытаний на наличие расслоений, трещин, смятия.

3 Марки и характеристики волоконно-оптических измерительных систем не приведены в тексте диссертации, не описано также какое измерительное оборудование необходимо использовать для снятия их показаний.

Высказанные замечания не снижают общей высокой оценки теоретической и практической значимости представленной диссертации.

Заключение

Диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании полученных автором теоретических и практических разработок приведены новые результаты, необходимые для создания новых научно обоснованных технических и

технологических решений в области силовых конструкций ракетно-космической техники – металлокомпозитного криогенного топливного бака для ракет-носителей на жидком топливе.

Работа выполнена и оформлена на высоком научно-техническом уровне и не содержит недобросовестных заимствований. Представленные результаты обоснованы и являются оригинальными.

Диссертационная работа «Проектирование, конструкция и изготовление металлокомпозитных криогенных топливных баков для ракетно-космической техники» соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук, а её автор, Склезнев Андрей Анатольевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.13. – «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Официальный оппонент,
Начальник управления научной
деятельностью, проф., д.т.н.



И.Е. Ковалев

Подпись Ковалева Игоря Евгеньевича заверяю

Учёный секретарь Учёного совета ФАУ «ЦАГИ»
доцент, доктор технических наук



С.А. Таковицкий

Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

Адрес: 140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

Тел./Факс: +7 (499) 556-4003

ru

Создан с помощью

12.09.2023 г.

