

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Склезнева Андрея Анатольевича

«Проектирование, конструкция и изготовление металлокомпозитных криогенных топливных баков для ракетно-космической техники», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.13. - «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Диссертационная работа Склезнева Андрея Анатольевича посвящена **актуальной** теме – разработке новой конструкторско-технологической концепции несущего криогенного металлокомпозитного топливного бака с использованием сетчатых конструкций, что позволяет повысить экономичность и весовую эффективность использования изделий ракетно-космической техники. Применение композиционных материалов для криогенных топливных баков и разработка новых конструктивно-силовых схем их применения становятся неизбежными в силу практически полного исчерпания путей повышения прочности традиционных конструкционных материалов на основе металлических сплавов. В связи с этим возникает комплекс проблем требующих решения: создание методов проектирования и расчёта, решение ряда технологических и эксплуатационных задач, ранее не возникавших и не решённых в настоящий момент.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, 6 глав, заключения и приложений. Структура работы отражает перечень задач, требующих решения в соответствии с поставленной в работе целью. В диссертации сформулирована научная проблема, заключающаяся в необходимости разработки новых научно обоснованных технических и технологических решений для конструирования высокопрочных криогенных топливных баков на основе металлокомпозитных ёмкостей и силовых сетчатых структур и направленная на повышение экономической эффективности изделий ракетно-космической техники.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«12» 09 2023.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы; сформулированы цель и задачи исследований; представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; обоснована степень достоверности; перечислены положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации результатов работы и публикациях.

Первая глава посвящена обзору современного состояния исследований в области конструкций несущих топливных баков, применяемых как в Российской Федерации, так и за рубежом, проведён анализ конструктивно-технологических особенностей баков. Отмечены недостатки традиционных металлических конструкций баков, описаны альтернативные варианты конструкций.

На основе проведённого обзора конструкций из полимерных композитов, применяемых в ракетно-космической технике, проанализирован опыт в области проектирования, расчёта, технологической отработки и изготовления металлокомпозитных баллонов и баков различного назначения. Проведен подробный анализ обширного опыта проектирования, расчёта и технологической реализации силовых несущих сетчатых конструкций и полученных в этой области результатов. А. А. Склезневым предложена новая конструктивно-технологическая концепция криогенного топливного бака в виде металлокомпозитного бака, интегрально соединяющего металлокомпозитные ёмкости и сетчатые анизотридные силовые структуры.

Глава 2 посвящена разработке методики оптимального проектирования металлокомпозитного криогенного топливного бака. Рассмотрены две задачи проектирования конструкции металлокомпозитных баков: проектирование металлокомпозитной ёмкости под действием внутреннего давления и проектирование сетчатой структуры, воспринимающей внешние силовые факторы. Приводится информация о модифицированной диссертантом методике оптимального проектирования вафельных топливных баков по условию минимума массы с ограничениями

по прочности от осевого усилия и внутреннего давления, общей и местной устойчивости полотна ячейки вафельной структуры.

Далее выполнено проектирование модельного металлокомпозитного топливного бака, проведён поверочный расчёт при помощи метода конечных элементов и выполнено сравнение проектных параметров с параметрами аналогичного по геометрическим размерам и условиям нагружения металлического вафельного бака. Автором установлено, что весовая эффективность металлокомпозитного криогенного топливного бака заметно превышает эффективность аналогичной вафельной оболочки из алюминиевого сплава. Разница в массе составляет 30% и более.

В третьей главе рассмотрены технологические задачи реализации предложенного в работе конструктивно-технологического решения. В главе описана разработанная при непосредственном участии автора промышленная технология изготовления металлокомпозитных криогенных топливных баков, новизна которой заключается в применении в качестве неизвлекаемой технологической оснастки структурных компонентов самого бака. На первом этапе изготовления в качестве оснастки выступает тонкостенный изотропный герметизирующий лейнер, с помощью которого формируется силовой слой композита для восприятия внутреннего давления. На втором этапе в качестве оснастки выступает сама металлокомпозитная ёмкость, на которой методом автоматизированной «мокрой» намотки создаётся несущая сетчатая структура и наружная обшивка.

В работе решены две важные технологические задачи, одна из которых связана с обеспечением необходимой по технологическим условиям величины натяжения ленты в процессе автоматизированной «мокрой» намотки и возможной потери устойчивости лейнера. Натяжение нитей приводит к возникновению наружного давления на цилиндрической части лейнера, что может привести как к местной, так и к общей потере устойчивости металлической оболочки. Для решения этой задачи были использованы нелинейные уравнения теории цилиндрических оболочек.

Получено универсальное выражение для критического натяжения, зависящего от радиуса, изгибной жёсткости оболочки D и параметра λ_{cr}^2 , расчётное значение которого составляет 732. Данное значение параметра подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями, проведёнными автором на образцах из различных материалов.

Вторая задача связана с обеспечением устойчивости тонкостенного лайнера, заключённого в композитный силовой слой при температурной обработке. Из-за разницы коэффициентов линейного температурного расширения композита и металла в лайнере возникают сжимающие напряжения, которые могут привести к потере устойчивости. Полученная в работе полуэмпирическая формула может быть использована для сравнения критической деформации внутренней оболочки с деформацией, возникающей от воздействия перепада температур во время термообработки. Также подробно рассмотрено влияние типа используемого формообразующего материала на механические характеристики рёбер сетчатой структуры и определены пути, которые ведут к повышению данных характеристик. Рассмотрены проблемы внедрения измерительных систем в материал и конструкцию бака. Проведена экспериментальная отработка внедрения оптоволоконных измерительных систем с решётками Брэгга в модельный бак. А. А. Склезневым разработано специализированное программное обеспечение для расчёта технологических параметров изготовления бака.

4 Глава посвящена эксплуатационным задачам, связанным с применением криогенного металлокомпозитного бака. Автором разработана математическая модель интегральной стенки бака, которая учитывает деформируемость сетчатой структуры по толщине и позволяет определять коэффициенты жёсткости слоёв и стенки бака, их деформации, прогибы, контактные взаимодействия между слоями и коэффициент теплопроводности стенки бака в радиальном направлении. Автором разработано

специализированное программное обеспечение для расчёта данных характеристик для баков различных геометрических размеров и параметров нагружения, с помощью которого исследовано влияние температурного режима и нагружения бака внутренним давлением. Учтено влияние локальных подкрепляющих шпангоутов, предложена модифицированная конструкция таких шпангоутов. С помощью метода Бубнова-Галёркина получено приближённое решение задачи устойчивости тонкостенного изотропного лейнера, находящегося в жёстком слое композита, при действии осевой сжимающей нагрузки. В такой постановке ранее такая задача решалась только численно с помощью метода конечных элементов. В работе получено простое аналитическое выражение для расчёта критической деформации потери устойчивости, которая зависит от радиуса и толщины оболочки (лейнера).

Глава 5 содержит результаты экспериментальных испытаний модельного криогенного металлокомпозитного бака. Изготовленный по разработанной технологии и проектным параметрам модельный бак выдержал 10 захолаживаний жидким азотом. Затем бак был заправлен жидким азотом (0.5 Мпа) и нагружен осевой сжимающей эквивалентной силой до разрушения. Получено разрушающее усилие, незначительно отличающееся от расчётной величины 3.92 МН. Экспериментальные результаты подтверждают правильность изложенных в работе методов проектирования и расчёта баков с предложенной конструктивно-силовой схемой.

В главе 6 представлены результаты применения разработанных методик проектирования конструкции и методов расчёта технологических параметров к полноразмерным топливным бакам перспективных ракет-носителей среднего класса, имеющим диаметр порядка 4.1 м и длину до 20 м, создаваемых в настоящее время различными организациями. Приведены результаты определения оптимальных параметров металлокомпозитных криогенных баков в сравнении с оптимальными параметрами аналогичных

по размерам и нагрузкам металлических вафельных баков. Результаты проектирования баков с конструктивными параметрами, соответствующими реальным параметрам ступеней ракет-носителей, подтверждают возможность снижения массы изделий на 34 % .

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- создана и экспериментально отработана принципиально новая конструктивно-технологическая концепция криогенного топливного баков интегрально комбинирующая в себе металлокомпозитный бак и несущую анизотропную структуру;
- разработаны методы проектирования и расчёта конструкции металлокомпозитного топливного бака. Решены задачи устойчивости цилиндрической оболочки в виде тонкостенного металлического лайнера при нагружении давлением, вызванным натяжением гибкой системы нитей при намотке; при воздействии температурной обработки в ходе отверждении изделия; при действии осевой сжимающей силы;
- решена задача о взаимодействии сетчатой оболочки с наружной и внутренней обшивками и металлическим лайнером с учётом деформируемости сетчатой оболочки в радиальном направлении. Разработана математическая модель силовой стенки бака, позволяющая определять коэффициенты жёсткости и теплопроводности, деформации и прогибы функциональных слоёв стенки бака;
- разработана комплексная модель оценки прочности конструкции металлокомпозитного криогенного топливного бака, работоспособная на всех этапах жизненного цикла изделия, при проектировании, изготовлении, испытаниях и эксплуатации;
- на основе теоретического анализа исследовано контактное взаимодействие между функциональными слоями силовой стенки металлокомпозитного криогенного бака интегральной конструкции,

которое может привести к отслоению металлического лайнера при действии криогенных температур. Исследовано влияние подкрепляющего шпангоута на контактные силы, возникающие между композитной оболочкой и металлическим лайнером.

Теоретическая и практическая значимость работы диссертационной работы определяется разработанной новой промышленной технологией изготовления металлокомпозитных криогенных топливных баков, заключающейся в использовании металлокомпозитного бака в качестве технологической оснастки при изготовлении несущей анизотридной структуры стенки криогенного топливного бака. Созданные методы расчёта и оптимизации конструкции бака положены в основу разработанного специализированного программного обеспечения, применяемого АО «ЦНИИСМ» и АО «ЦПР» при проектировании металлокомпозитных ёмкостей, в том числе с несущими силовыми стенками. Отработана производственная технология внедрения в материал конструкции измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков с решётками Брэгга для измерения деформаций и температур в непрерывном режиме и без ухудшения механических характеристик полимерного композитного материала конструкции.

Степень достоверности результатов и разработанных автором методик проектирования и расчёта обеспечивается применением апробированных аналитических и численных методов расчёта и подтверждается путём сравнения проектных расчётных результатов с экспериментально полученными данными на образцах композитных материалов, элементов оболочек и модельном баке.

Соответствие публикаций и автореферата диссертационной работе

Автореферат и список публикаций полностью отражают содержание диссертации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 научных статьях в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, двух статьях, вошедших в базу данных Scopus. По

результатам работы получено 2 патента РФ на изобретения, 1 патент на полезную модель и 5 свидетельств о государственной регистрации Программ для ЭВМ.

По диссертационной работе имеются некоторые **замечания**:

1. В работе не уделено достаточного внимания прочности композитного материала шпангоутов в зонах мест крепления к смежным элементам конструкций.

2. Отсутствуют оценки влияния отверстий и люков в днищах бака на несущую способность и технологичность изготовления.

3. В случае длительного воздействия различных факторов космического пространства, в частности, ионизирующего излучения, глубокого вакуума, значительного перепада температур в расчетах не учитывалось деградация физико-механических характеристик композитного материала.

4. Имеются некоторые опечатки по тексту работы и автореферата.

Данные замечания носят частный характер и не влияют на общую высокую оценку и значимость полученных автором научных и практических результатов.

Оценка работы.

Диссертационная работа Андрея Анатольевича Склезнева посвящена решению актуальной научной проблемы создания новых научно обоснованных технических и технологических решений, которые вносят значительный вклад в создание новых энергоэффективных высокопрочных криогенных топливных баков на основе металлокомпозитных ёмкостей и силовых сетчатых структур. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой и выполнена на высоком научном уровне. Диссертация Склезнева А.А. соответствует всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к докторским диссертациям, в том числе требованиям п.п. 9-

14. Автор работы, 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 – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Адрес: Малый Харитоньевский переулок, д.4, г. Москва, 101000

E-mail: Nik_Azikov@mail.ru

Телефон +7 (916) 491 -5007



Н.С. Азиков
(подпись)

Подпись Н.С. Азикова удостоверяю.

Ведущий специалист по кадрам





Розанов С.М.

Сопровождаю означенным 12.09.2023г.
