

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента, директора Акционерного общества «Центр перспективных разработок» Склезнева Андрея Анатольевича на диссертационную работу Волковой Ольги Юрьевны «Рациональное проектирование структуры армирования композитных сосудов давления», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твёрдого тела»

Актуальность темы

Повышение массового совершенства создаваемой техники, в частности, снижение массы конструкций летательных аппаратов в настоящее время возможно за счёт применения современных лёгких материалов с высокими прочностными и жесткостными характеристиками – полимерных композитных материалов.

Уменьшение массы сосуда давления возможно за счёт применения в его конструкции силового композитного слоя, уменьшения толщины металлического лайнера, а также замена герметизирующего металлического лайнера на лайнер, выполненный из полимерных материалов.

В диссертации представлен новый подход к вопросу создания инженерных методов рационального проектирования и оценке влияния технологических факторов на процесс изготовления сосудов высокого давления с силовым композитным слоем.

Решение обозначенной выше проблемы позволяет в целом повысить весовую эффективность сосудов высокого давления, повысить их технико-эксплуатационные свойства. Несомненно, решение данной научной задачи определяет **актуальность** темы диссертации.

Структура и объём работы

Диссертация О.Ю. Волковой на соискание учёной степени кандидата технических наук состоит из введения, четырёх глав, заключения и общих

выводов, списка литературы, включающего 140 наименований используемых публикаций отечественных и зарубежных авторов, и трех приложений. Основное содержание изложено на 169 страницах, включает 21 таблицу, 60 рисунков и 3 приложения.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и перечень задач, требуемых исследования и решения, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимости полученных результатов, указан личный автора, 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 применения волокнистых композитов в сосудах давления и анализу эффективности композитных материалов в баллонах по сравнению со сталью. В главе рассмотрены вопросы применения методов расчёта сосудов давления, применения различных технологий их изготовления, сформулирована задача исследований – создание инженерной методики проектирования и оптимизации структуры армированных с учётом различных технологических факторов, влияющих на их механические свойства.

Глава 2 посвящена анализу математического аппарата, применяемого в как в процессе проектирования конструкции баллонов давления, так и при решении задач их расчёта, оценки устойчивости деформирования. В главе проведён анализ применяемых критериев прочности для композитных сосудов давления, как для анизотропных моделей баков, так и для анализа разрушений в направлениях, отличных от направлений армирования, совпадающих с действием главных напряжений.

В **третьей главе** рассмотрены вопросы разработки новых методов проектного расчёта сосудов давления с композитным силовым слоем и вопросы

их рациональной структуры армирования. Оценка напряженно-деформированного состояния проводится как методами послойного расчёта напряжений, применением моноотропной модели, так и при помощи МКЭ. В работе представлено разработанное на языке Python ПО, предназначенное для выбора рациональной структуры армирования с учётом деградации свойств слоёв в процессе докритического разрушения.

4 Глава, наиболее интересная для инженерного применения, посвящена практическим вопросам потери устойчивости оболочек сосудов давления, связанному с технологическими факторами их изготовления. Для этого, автором рассмотрено две задачи – первая, связанная с возникновением неустойчивости деформирования тонкостенных пластин и оболочек при плоском напряженном состоянии – для выбора применяемого критерия прочности. Вторая задача связана с оценкой устойчивости слоёв композитного материала или герметизирующего лайнера, потеря которой может происходить от их обжатия внешними слоями с выплёскиванием потерявших устойчивость слоёв внутрь сосуда давления. При этом, оценка толщины потерявшего устойчивость слоя и критического напряжения, приводящего к потере устойчивости, осуществляется при помощи энергетического критерия. Важно отметить, что применение энергетического критерия даёт возможность в дальнейшем развить результаты, представленные в работе, для оценки влияния возможных технологических дефектов изготовления композитных сосудов давления, таких как непрочлеи между технологическими слоями материала.

В **заключении** сформулированы основные новые научные результаты по диссертационной работе.

Оформление диссертации и автореферата в целом соответствует требованиям ГОСТ 7.011-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Автореферат диссертации корректно

отражает её содержание. Список цитируемой в диссертации литературы из 140 наименований, в том числе 32 зарубежных публикаций, свидетельствует о глубоком изучении соискателем рассматриваемой проблемы.

Соответствие содержания диссертационной работы заявленной специальности

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твёрдого тела»:

- п. 4 «Механика композиционных материалов и конструкций, механика»
- п. 9 «Устойчивость процессов деформирования»
- п. 12 «Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела»

Степень разработанности темы, обоснованность научных положений и выводов

На основе проведённого критического анализа проблемы создания новых инженерных методик проектирования и оценки технических характеристик создаваемых новых сосудов высокого давления из композитов, определено, что в настоящий момент не в полной мере представлены инженерные решения для создания конструкций подобного рода.

В диссертации выполнено комплексное исследование с целью обоснования рациональных структур армирования, а также определения обоснованных критериев прочности, учитывающих различные виды разрушения и описывающих в пространстве напряжений используемые при намотке композитных сосудов давления для симметричных пар слоёв предельные поверхности кусочно-линейного типа.

Сформулированная в диссертации цель достигнута, поставленные в связи с этим задачи решены полностью. Научные положения и сформулированные выводы вполне обоснованы.

Новизна и достоверность полученных результатов

Новые научные результаты, полученные в диссертации, заключаются в следующем

1. Предложен инженерный метод оптимизации структуры армирования намоточных сосудов давления путём подбора углов армирования с использованием моноотропной (нитяной) модели с последующей проверкой уточнённым послойным методом.

2. Предложена методика обеспечения повышения расчётного критического давления по сравнению с рассматриваемой структурой и построены кусочно-линейные предельные поверхности в пространстве напряжений.

3. Разработан простой в практическом использовании подход для послойного расчёта имеющих в своей основе симметричные пары слоёв композитных конструкций.

4. На основе энергетического критерия проведён анализ потери устойчивости внутренних слоёв в композитных сосудах давления и получены значения критического сжимающего напряжения и характерной толщины выщёлкиваемого слоя.

5. Даны количественные оценки условий потери устойчивости деформирования при двухосном растяжении металлического лейнера

Достоверность результатов и разработанных методов проектирования обеспечивается согласованием расчётных и экспериментальных значений для разных углов армирования, коэффициентов запаса для предельных прямоугольников и эллипсов, а также для построения предельных поверхностей при двухосном нагружении стеклопластиковых труб и оценки напряженно-деформированного состояния баллона давления, выполненного методом непрерывной намотки.

Теоретическая и практическая значимость диссертации

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключаются в следующем:

- созданы инженерные методы расчёта и оптимизации сосудов давления из композиционных материалов для различных отраслей промышленности, созданных методом намотки;

- определены критерии прочности, учитывающие вариативные механизмы разрушения. Критерии прочности выведены для построения предельных поверхностей относительно каждой пары слоёв;

- созданы методики решения обратной задачи (с использованием моноотропной модели) подбора равнонапряжённой структуры армирования;

- представлены программы выбора рациональной структуры армирования с учётом деградации свойств слоёв в процессе докритического разрушения путём подбора углов армирования по моноотропной модели с последующей проверкой послойным методом.

Основные результаты диссертации изложены в 23 научных работах, при этом 4 статьи опубликована в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ и 10 статей опубликованы в журналах Scopus/Web of Science. Результаты диссертационной работы апробированы на Всероссийских и Международных научных конференциях.

Замечания по диссертационной работе:

1. Приведённые в главе 4 характеристики материалов, применяемые для расчёта в модельных задачах выглядят несколько несбалансированными. Например, задаётся модуль упругости величиной 45 ГПа, при этом минимальное критическое напряжение (сжатия) – 900 МПа. Здесь модуль выглядит заниженным, похожим на модуль композитного материала с армированием тканым наполнителем, в то же время прочность на сжатие кажется для такого

материала недостижимо высокой – схожей с прочностью на сжатие однонаправленного материала при сжатии в направлении армирования.

2. Имеются некоторые опечатки по тексту работы и автореферата, в частности в диссертации две таблицы, следующие друг за другом, имеют один номер 3.10.

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

Заключение

На основе анализа материалов диссертации и автореферата, а также замечаний, приведённых выше, можно сделать вывод, что диссертационная работа Волковой Ольги Юрьевны является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании полученных автором теоретических и практических разработок решена научная задача, имеющая важное практическое значение для развития авиа-космической промышленности и создания новых высокоэффективных силовых конструкций космической техники – металлокомпозитных баков высокого давления.

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

Диссертационная работа «Рациональное проектирование структуры армирования композитных сосудов давления» 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 кандидата технических наук, в том числе требованиям п.п. 9-14, а её автор, Волкова Ольга Юрьевна, заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Официальный оппонент – доктор технических наук (научная специальность 2.5.13. – Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов), доцент (2.5.13), Склезнев Андрей Анатольевич, директор Акционерного общества «Центр перспективных разработок». 141371, Московская обл, Сергиево-Посадский г/о, г. Хотьково, ул. Черняховского, д. 18б, помещение 36

e-mail: skleznev@crism-cat.ru

Телефон +7 (495) 223-01-09



А.А. Склезнев

(подпись)

«11» июне 2024 г.

Подпись Склезнева Андрея Анатольевича заверяю

Главный специалист по кадрам



(подпись)

В.С. Жгутова