

«УТВЕРЖДАЮ»



Заместитель генерального
директора по науке

ФГУП «НАМИ»

Г.Г. Надарейшвили

«26» мая 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – государственного научного центра Российской Федерации Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ») на диссертационную работу Волковой Ольги Юрьевны «Рациональное проектирование структуры армирования композитных сосудов давления», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы исследования

В настоящее время использование полимерных волокнистых композитов чрезвычайно перспективно не только для космической и авиационной техники, но и для наземного транспорта, оно обуславливает новые возможности дизайна, снижение массы и энергоемкости производства, экономию топлива, уменьшение количества деталей, отсутствие коррозии.

Одними из объектов, в которых применение композитов наиболее эффективно, можно считать сосуды давления. Применительно к сосудам давления одним из основных преимуществ волокнистых композитов (наряду с безопасным видом разрушения, высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью) можно считать возможность выбора оптимальной структуры армирования, согласованной с возникающим полем напряжений. Это определяет большой интерес к исследованию композитных баллонов не только технологов, изучающих влияние разных факторов, но и механиков, использующих современные программные комплексы в расчетах донной

части баллонов и зоны полюсных отверстий. Наряду с оптимизацией структуры армирования важным направлением следует считать топологическую оптимизацию формы композитных изделий. Особое прикладное значение имеют попытки анализа влияния статистического разброса свойств материалов, геометрических размеров изделия, приложенных нагрузок, что предлагается учитывать методом рассчитанных интервалов.

На сегодняшний день в нашей стране происходит стабильное повышение цен на традиционные виды топлива, бензины и дизельные топлива, однако цены на природный газ повышаются не столь значительно. Доля транспорта, конвертированного для работы на газе, хоть и растет, но все еще крайне мала. Этому способствует множество факторов, один из них, это безопасность эксплуатации газовых транспортных средств. Использование композитных баллонов более безопасно в связи с волокнистой структурой армирования. Сосуды давления из композитных материалов имеют ряд преимуществ по сравнению со стальными аналогами, но уступают им по стоимости. Таким образом, можно сделать вывод, что композитные сосуды давления – это сравнительно новое устройство для хранения сжатого газа, но они постепенно вытесняют свои металлические аналоги с рынка. Это объясняется тем, что они более удобны и безопасны в эксплуатации. При правильном использовании и грамотном обслуживании емкость для газа из композита безупречно прослужит много лет. Поэтому данная тема актуальна для отрасли автомобилестроения.

Цель и объект исследования

Заявленной целью исследования является создание инженерных методов рационального проектирования структуры армирования композитных сосудов давления, позволяющих снизить массу баллонов при сохранении требований по прочности и надежности.

Объектом исследования являются композитные сосуды давления из стекло- и углепластика, армированные симметричными парами слоев.

Предмет исследований – оценка равнонапряженной структуры армирования с симметричными парами слоев, которая позволяет создать

эффективную инженерную методику, которая в то же время, в отличие от традиционных методов, применяемых в оптимальном проектировании, не будет сопровождаться длительными и неудобными процедурами вычисления.

Основные результаты работы

На защиту выносятся следующие основные результаты диссертации, полученные автором самостоятельно в ходе выполнения работы:

1. Механо-математические методы проектного расчета композитных сосудов давления: послойный метод расчета напряжений для симметричных пар слоев; упрощенный послойный метод с расчетом упругих свойств через основной инвариант тензора упругих модулей монослоя.

2. Построение кусочно-линейных предельных поверхностей прочности в пространстве напряжений на основе критериев прочности для пар слоев, учитывающих разные механизмы разрушения.

3. Компьютерная программа автоматизированного расчета несущей способности композитного баллона для оптимизации структуры армирования с верификацией результатов расчета имеющимися экспериментальными данными.

Научная новизна работы

1. Предложен и обоснован новый метод оптимизации структуры армирования намоточных сосудов давления путем выбора углов армирования по нитяной аналогии с последующей проверкой уточненным послойным методом.

2. Впервые разработана методика обеспечения роста расчетного критического давления по сравнению с той структурой, которая используется на практике для композитного баллона и построены кусочно-линейные предельные поверхности в пространстве напряжений.

3. Впервые разработан более эффективный (надежный и простой) по сравнению с традиционным расчетом по монослоям подход для послойного расчета имеющих в своей основе симметричные пары слоев композитных конструкций.

4. На основе энергетического критерия проведен анализ потери

устойчивости внутренних слоев в композитных сосудах давления и получены значения критического сжимающего напряжения и характерной толщины выщелкиваемого слоя.

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

Практическая ценность диссертации

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для расчета композитных сосудов давления и гибких шлангов (с учетом возможного изменения углов армирования при нагружении) с помощью разработанной методики проектирования и программы по автоматизированному расчету несущей способности композитного баллона для быстрого (инженерного) алгоритма оптимизации структуры армирования с учетом деградации свойств слоев в процессе докритического разрушения.

Степень достоверности результатов подтверждена согласованием расчетных 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.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором

По теме диссертации автором опубликованы 23 научные работы, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 10 статей в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science. Результаты работы также представлены в форме 10 докладов на международных и всероссийских научно-практических конференциях 2020 - 2024 гг.

Объем и структура диссертации включают в себя 169 страниц основного текста, введения, четырех глав, заключения, списка литературы (150 источников) и трех приложений.

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы, описывается актуальность научной работы, цели и задачи исследования,

научная новизна, степень разработанности проблемы, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, личный вклад автора, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приводится обзор известных методов расчета и оптимизации структуры армирования композитных сосудов давления, а также основных технологий изготовления композитных баллонов. Помимо этого, рассматриваются известные принципы повышения эффективности применения композитов в различных отраслях гражданского и специального машиностроения.

Во второй главе приведен краткий анализ математического аппарата, необходимого в процессе рационального проектирования структуры армирования для описания деформирования и разрушения композитных сосудов давления. Для оценки устойчивости деформирования тонкостенных пластин и оболочек при плоском напряженном состоянии рассматриваются критерии, учитывающие различные механизмы разрушения, а именно модель ромба из нерастяжимых нитей, применяется в работе для определения рациональной структуры армирования с симметричными парами слоев.

В третьей главе приводятся новые методы проектного расчета композитных сосудов давления и оптимизации структуры армирования. В частности, наибольшее внимание уделено расчетам напряженно-деформированного состояния цилиндрической части баллона методом конечных элементов, а также математическим методам расчета композитных сосудов давления. Представлена разработанная компьютерная программа для выбора рациональной структуры армирования с учетом деградации свойств слоев в процессе докритического разрушения путем подбора по нитяной аналогии с последующей проверкой послойным методом.

В четвертой главе приводится анализ двух задач о потере устойчивости композитных пластин и сосудов давления. Первая задача связана с возникновением неустойчивости деформирования тонкостенных пластин и оболочек при плоском напряженном состоянии для идентификации критериев прочности. Вторая задача заключается в обосновании для

композитных труб и цилиндрических сосудов давления в случае потери устойчивости сжимаемых слоев методов оценки опасности расслоений.

В заключении обобщены основные выводы и результаты диссертационной работы.

Соответствие научной специальности

Работа соответствует шифру специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела»: и относится к трем направлениям исследований по пунктам 4, 9 и 12 области исследований:

«п. 4. Механика композиционных материалов и конструкций, механика интеллектуальных материалов»;

«п.9. Устойчивость процессов деформирования»;

«п.12. Вычислительная механика деформируемого твердого тела».

Диссертацию следует рассматривать как законченную теоретическую и практическую разработку, результаты которой составляют научную новизну и получены автором лично. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Основные замечания

1. В главе 1 проводится обзор опыта проектирования сосудов давления из слоистых полимерных композиционных материалов, в том числе, перечисляются наиболее часто используемые для этого материалы и приводятся для сравнения их характеристики. Однако характеристик углепластиков не приведено несмотря на то, что они часто используются при изготовлении сосудов давления.

2. В 3-й главе приведён упрощённый послойный метод моделирования разрушения для «сильно слоистых анизотропных композитов». Непонятно, какие именно слоистые анизотропные композиты имеются ввиду.

3. В разделе 3.1 представлены результаты расчетов прочности композитного сосуда, однако нет никаких данных о его материалах, конструкции, размерах, массе.

4. В разделе 3.6 представлены подходы к оценке и результаты расчетов коэффициента безопасности конструкции, однако не приведены рекомендации по выбору предельных значений этого важного показателя.

5. В главе 4 проводится анализ потери устойчивости. Приведённые фотографии результатов экспериментов по потере устойчивости различных материалов взяты из других научных работ (соответствующие ссылки присутствуют), при этом никак не описаны условия проведения экспериментов, а также оценены значения толщины выщёлкиваемого слоя и значения критического напряжения при расслоении, но в представленных материалах не ясно подтверждены ли полученные значения экспериментально.

Представленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Волковой О.Ю., которая посвящена актуальной теме и выполнена на высоком уровне.

Заключение

Диссертационная работа Волковой О.Ю. на тему: «Рациональное проектирование структуры армирования композитных сосудов давления» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной под руководством доктора физико-математических наук, доцента А.А. Скворцова, содержащей новое решение актуальной задачи улучшения прочности и надежности композитных сосудов давления, приводит к повышению расчетного критического давления газа в баллоне примерно на 40% и оценки опасности дефектов типа расслоений на основе анализа особых механизмов разрушения с помощью специальных энергетических критериев, включающих характеристики межслойной трещиностойкости композитов, что имеет существенное значение для научного направления, определяемого специальностью 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела (технические науки).

Актуальность темы, новизна научных результатов, практическая ценность и реализация результатов дают основания считать, что диссертационная работа Волковой О.Ю. удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями).

Автор диссертации Волкова Ольга Юрьевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв на диссертацию, составленный на основании заключения отдела моделирования прочности и жесткости центра «Численный анализ и виртуальная валидация» обсужден и одобрен на заседании научно-технического совета ФГУП «НАМИ» 25 июня 2024 г., протокол № 10.

Отзыв составили:

Начальник отдела моделирования
прочности и жесткости Центра
«Численный анализ и виртуальная
валидация» ФГУП «НАМИ»
email: anna.shumakova@nami.ru
тел: 8 (495) 456-40-31, доб. 60-66



Шумакова
Анна Николаевна

Начальник управления
перспективных энергоустановок
Центра «Энергоустановки»
ФГУП «НАМИ»,
д-р техн. наук, проф.
email: a.kozlov@nami.ru
тел: 8 (495) 456-40-31, доб. 1-44



Козлов
Андрей Викторович

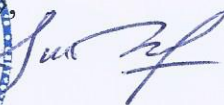
Подписи Шумаковой А.Н. и Козлова А.В.
удостоверяю.

Учёный секретарь НТС ФГУП «НАМИ»,

к.т.н.

email: r.muhametzyanov@nami.ru

тел: 8 (495) 456-57-00, доб. 69-21



Мухаметзянов
Ринат Гарапшевич

Сведения о ведущей организации:

Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»)

Адрес: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2

Телефон: +7 (495) 456-57-00. E-mail: info@nami.ru