

На правах рукописи



Волкова Ольга Юрьевна

**РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ**

Научная специальность 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет» на кафедре «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов».

Научный руководитель: **Скворцов Аркадий Алексеевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

Официальные оппоненты: **Склезов Андрей Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, директор АО «Центр перспективных разработок»

Азаров Андрей Валерьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»

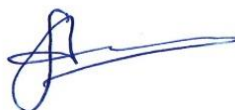
Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»

Защита состоится «05» сентября 2024 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.410.03 на базе ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» по адресу: 170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22, ауд. Ц-208.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет» и на сайте ВУЗа по адресу: <https://new.tstu.tver.ru/science/dissertation/24.2.410.03/#pills-defense>

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



**Алексеев
Андрей Алексеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена растущим спросом на полимерные волокнистые композиты, их широким применением в различных отраслях промышленности, а также постоянным развитием технологий и потребности в совершенствовании композитных материалов (КМ) и конструкций.

Одной из областей, где применение композитов особенно эффективно, являются сосуды давления. Новые материалы и методы изготовления позволяют создавать композитные сосуды давления с более высокими параметрами прочности, устойчивостью к коррозии и температурным воздействиям. Это открывает новые возможности для применения композитных баллонов и требует проведения дальнейших исследований по оптимизации и улучшению их свойств.

Волокнистые композиты применительно к сосудам под давлением обладают рядом преимуществ. К ним, в частности, относятся устойчивость к коррозии, удельная прочность высокого порядка, а также отсутствие образования осколков в случае разрушения. Кроме этого, необходимо упомянуть возможность адаптивной к напряжениям оптимизации самой структуры армирования. Этим вызван наблюдаемый высокий интерес у ученых, имеющих дело с баллонами композитного типа. Так, механики в первую очередь сосредоточены на производстве расчетов зон полюсных отверстий и также донной части таких баллонов с использованием передового оборудования и программных средств. В то же время технологи изучают аспекты влияния разного рода факторов в данной области.

Специфика композитов открывает широкие перспективы применения в различных отраслях промышленности, включая авиацию и аэрокосмическую технику, где ключевым момент является снижение массы конструкции. Поэтому данная задача по обеспечению снижения веса композитных конструкций, остается ключевой в оптимальном проектировании. Традиционные методы оптимизации, основанные на нелинейном программировании, хоть и эффективны, но требуют значительных вычислительных ресурсов. В случае волокнистых композитов развиваются более рациональные методы проектирования, основанные на принципе равнонапряженности волокон.

Кроме расчетных методов чрезвычайно важно развивать и обосновывать экспериментальные методы надежного определения механических свойств материалов-конструкций композитного типа. Это связано с тем, что при «композитном проектировании» материал и конструкция создаются одновременно, они неразделимы.

Существуют различные методы и технологии изготовления композитных сосудов давления. В первую очередь стоит упомянуть популярный метод, когда такие композиты создаются в процессе непрерывной намотки. Полимерным связующим в данном случае пропитывается лента, которая может быть либо изготовлена из ткани, либо иметь в основе систему нитей. На следующем этапе берется вращающаяся оправка, на которую и наматывается такая лента. Оправка при этом укладывается в различных направлениях и, что важно, повторяет форму

внутренней поверхности сосуда. В процессе изготовления спустя некоторое время осуществляется отверждение, удаление такой оправки. Происходит это при достижении желаемой толщины. Рассматриваемый метод дает возможность производства оболочек сложной формы и с высокой точностью реализовывать различные схемы армирования изделий из композитных материалов.

Таким образом, широкое применение полимерных волокнистых композитов в сосудах давления сохраняет актуальность и востребованность методов расчета и оптимального проектирования композитных конструкций.

Степень разработанности проблемы. Исследования в области механики деформируемого твердого тела, посвященные методам оптимизации конструкций из композитных и традиционных материалов, были опубликованы в научных работах ряда отечественных и зарубежных ученых Н.В. Баничука, В.А. Бунакова, Н.А. Алфутова, В.В. Васильева, П.А. Зиновьева, В.Л. Нарусберга, Ю.В. Немировского, И.Ф. Образцова, В.Н. Скопинского, Б.Г. Попова, Р.Б. Рикардса, А.А. Смердова, Г.А. Тетерса, Р.Т. Хафтки, В.В. Чедрика и др.

Цель и задачи исследования. Цель работы заключалась в создании инженерных методов рационального проектирования структуры армирования композитных сосудов давления, позволяющих снизить массу баллонов при сохранении требований по прочности и надежности.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие методы изготовления намоточных сосудов давления из композиционных материалов для обоснования рациональных структур армирования.

2. Обосновать механически обоснованные критерии прочности, учитывающие различные виды разрушения и описывающие в пространстве напряжений используемые при намотке композитных сосудов давления для симметричных пар слоев предельные поверхности кусочно-линейного типа.

3. Используя новые критерии прочности и нитяную модель, разработать с целью решения задачи подбора равнонапряженной структуры армирования 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.

4. В программном комплексе ANSYS осуществить расчеты методом конечных элементов для зон полюсных отверстий, донной части и цилиндрической части.

5. Разработать программу автоматизированного расчета несущей способности композитного баллона для быстрого (инженерного) алгоритма оптимизации структуры армирования.

6. Проанализировать условия потери устойчивости деформирования при двухосном растяжении металлического лейнера.

Научная новизна диссертации состоит в том, что:

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.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется созданием:

— инженерных методов расчета и оптимизации намоточных сосудов давления из композиционных материалов для различных отраслей промышленности, таких как, авиастроение, гражданское машиностроение, автомобилестроение;

— учитывающих вариативные механизмы разрушения критериев прочности, выведенных для построения предельных поверхностей относительно каждой пары слоев;

— методики решения обратной задачи (с использованием нитяной модели) подбора равнонапряженной структуры армирования при дополнительном условии отсутствия длительных и неудобных процедур вычисления, которые присущи традиционным методам, применяемым в оптимальном проектировании;

— программы выбора рациональной структуры армирования с учетом деградации свойств слоев в процессе докритического разрушения путем подбора углов армирования по нитяной аналогии с последующей проверкой послойным методом.

Методология и методы исследования. При проведении диссертационного исследования был использован комплекс аналитических и расчетных методов. Для численного анализа напряженных состояний цилиндрической, донной частей и зон полюсных отверстий композитного сосуда давления были применены аналитические методы расчета, а также метод конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе ANSYS на языке программирования APDL. Для анализа упругих и прочностных свойств были привлечены методы механики композитных материалов и в более широком смысле методы механики деформируемого твердого тела в целом. Построение в пространстве напряжений на основе критериев

прочности для пар слоев предельных поверхностей проводили с помощью компьютерной программы, написанной на языке Python. Используемые методы позволили достичь поставленных целей диссертационного исследования.

Положения, выносимые на защиту:

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.

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.

Апробация работы. Основные положения исследования обсуждались, докладывались и были одобрены на: международной студенческой научной конференции Московского Политеха «СНК-2020» (г. Москва, 2020 г.); международной научной конференции «Наука будущего – наука молодых» (г. Москва, г. Калининград, 2021 г.; г. Орел, 2023 г.); международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения «МИКМУС» (г. Москва, 2020 г. – 2023 г.); международном форуме «Ключевые тренды в композитах: Наука и технологии» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2022 г.); XIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (г. Санкт-Петербург, 2023 г.); всероссийской научно-практической конференции «Наука-общество-технологии-2024» (Московский Политех, г. Москва, 2024 г.).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 23 научных работах, из которых 4 и 10 - статьи в журналах, входящих в перечень ВАК и Scopus/Web of Science, соответственно.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи данного исследования. Автору принадлежит разработка методов построения предельных поверхностей прочности в пространстве напряжений на основе критериев прочности для пар слоев; написание программы рационального выбора углов армирования с целью создания равнонапряженной волокнистой структуры; анализ существующих методов изготовления намоточных сосудов давления из композиционных материалов для обоснования возможности реализации структур армирования рационального типа.

Структура и объем диссертации. Структурно работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем исследования составил 169 страниц, в том числе 21 таблица и 60 рисунков. Список литературы состоит из 140 источников. В работе содержатся 3 приложения.

Соответствие диссертационного исследования паспорту научной специальности. Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела»: п.4. Механика композиционных материалов и конструкций, механика интеллектуальных материалов; п.9. Устойчивость процессов деформирования; п.12. Вычислительная механика деформируемого твердого тела.

Автор выражает благодарность научному консультанту, д.т.н., профессору Полилову Александру Николаевичу за ценные советы и консультации, предоставленные в процессе написания диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности выбранной темы, определяются цель и задачи, методы, научная новизна, содержащаяся в работе. Оценена достоверность и обоснованность полученных результатов, указана их апробация, теоретическая и практическая значимость исследования, личный вклад автора, приведены основные положения, выносящиеся на защиту.

В первой обзорной главе рассматриваются следующие вопросы:

1. Принципы повышения эффективности применения композитов в различных отраслях гражданского и специального машиностроения.
2. Опыт применения волокнистых композитов в сосудах давления и анализ эффективности композитных материалов в баллонах по сравнению со сталью.
3. Методы расчета и оптимизации структуры армирования композитных сосудов давления.
4. Методы расчета и оптимизации композитных сосудов давления
5. Технологии изготовления композитных сосудов давления.

ПКМ (стекло-, угле-, боро-, органопластики) – полимерные композитные материалы - один из наиболее перспективных классов конструкционных композитов. Полимерные композитные материалы, которые используют в процессе намотки, применяются в различных отраслях промышленности благодаря широкому выбору волокон.

Большой вклад в развитие механики ПКМ внесли такие отечественные ученые, как Алфутов Н.А., Ашкенази Е.К., Амбарцумян С.А., Аннин Б.Д., Васильев В.В., Зиновьев П.А., Немировский Ю.В., Гибсон Р.Ф., Победря Б.Е., Лехницкий С.Г., Полилов А.Н., Милейко С.Т., Попов Б.Г., Работнов Ю.Н, Тарнопольский Ю.М., Вильдеман В.Э., Черепанов Г.П. и многие другие.

К числу зарубежных ученых, внесших наиболее заметный вклад в механику композитов, можно отнести Ву Э., Гордона Дж., Келли А., Кортена Х.Т., Фудзии Т., Цая С. и многих других.

Анализ физико-механических свойств композитов и эффектов, получаемых в

результате их применения, способствует подбору композиционных материалов для различных областей. Данный анализ позволяет выбрать объекты, в которых реализуются те или иные эффекты от применения композитных материалов.

Эффекты, достигаемые в результате использования полимерных композиционных материалов, можно подразделить на несколько типов:

- прямые эффекты, связанные с физико-механическими свойствами материалов;
- технологические, заключающиеся в упрощении обработки, понижении энергоемкости и создании безотходного производства;
- конструкционные, связанные с проектированием размеров, формы и схемы армирования материала.

Волокнистые композиты достаточно часто применяют для изготовления различных конструкций, в том числе сосудов давления, так как они имеют низкую плотность и вес. Одним из основных методов изготовления сосудов давления является непрерывная намотка. Композиты намного эффективнее стальных аналогов, и имеют ряд преимуществ.

Одной из основных проблем, которая стоит перед технологами – это проблема герметичности композитных сосудов высокого давления, которая связана с хрупким разрушением полимерной матрицы при растяжении однонаправленного армированного слоя поперек волокон. По данной теме было проведено большое количество исследований. В целом, увеличение предельной деформации матрицы $\bar{\epsilon}_{np}$ композита может привести к проблемам с деформацией при растяжении поперек волокон $\bar{\epsilon}_2$ и снижению прочности композита при растяжении вдоль волокон. Эти проблемы связаны с ограничениями, вызванными жесткостью волокон и их связью с матрицей композита.

Поэтому, хотя повышение предельной деформации матрицы может потенциально помочь избежать преждевременного разрушения матрицы, необходимо балансировать и учитывать все эти факторы при определении оптимального состава и структуры композитного материала. Это может включать в себя использование различных методов усиления матрицы или изменение волокон для улучшения связей «волокно-матрица».

К методам проектного расчета и оптимизации структуры армирования композитных баллонов можно отнести следующие:

- МКЭ-расчеты НДС цилиндрической, донной частей и зон полюсных отверстий;
- Нитяная аналогия, используемая при выборе оптимальных углов намотки (и контуров днищ);
- Математические методы расчета композитных сосудов давления;
- Метод послойного типа, применяемый для симметричных пар слоев с целью расчета напряжений;
- Оценка упругих свойств через инварианты (по Цаю);

- Методы, имеющие в своей основе критерии прочности и используемые в случае пар слоев (в пространстве напряжений) с целью построения предельных поверхностей прочности.

Сосуды давления композитного типа могут быть оптимизированы с использованием данных методов. При этом для баллонов сжатого газа могут применяться критерии прочности с целью повышения расчетного критического давления, может варьироваться количество пар слоев (с ориентацией разных типов), а также могут «плавно» подбираться углы армирования.

Во второй главе приведен краткий анализ математического аппарата, необходимого в процессе рационального проектирования структуры армирования для описания деформирования и разрушения композитных сосудов давления. Для анализа напряженно-деформированного состояния композитных материалах необходимо использовать определяющие соотношения, устанавливающие связь между тензором напряжений и тензором деформаций. При анализе распределения структурных напряжений в композитах из высокопрочных и высокомодульных волокон мы ограничиваемся уравнениями линейной теории анизотропной упругости и простыми гипотезами о равенстве продольных деформаций и поперечных напряжений в волокнах и в матрице однонаправленных композитов. Для оценки устойчивости деформирования тонкостенных пластин и оболочек при плоском напряженном состоянии необходимо применение критериев, учитывающих различные механизмы разрушения.

Обобщенный закон Гука, связывающий тензоры напряжений и деформаций, справедливый для сложного напряженного состояния и для анизотропных материалов, в общем виде записывается следующим образом:

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j, \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j, \quad (2)$$

где $i, j = 1, \dots, 6$, σ_i – компоненты тензора напряжений, C_{ij} – тензор упругих модулей, S_{ij} – матрица податливости, а ε_i – компоненты матрицы деформаций.

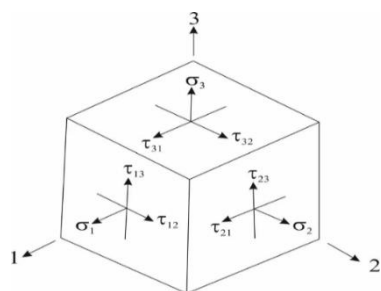


Рис.1. Компоненты тензора напряжений в элементе

Компоненты напряжений и система координат с осями 1, 2 и 3 показаны на рис. 1.

Закон Гука в условиях плоского напряженного состояния ортотропного материала для системы координат (1,2,3), связанной с ориентацией волокон (ось 1), можно записать в виде:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Однонаправленные монослои в композитном элементе конструкции ориентированы под разными углами, и локальные оси 1, 2 и 3 не совпадают с глобальной системой координат (x, y, z). Поэтому упругие свойства однонаправленных монослоев необходимо связать с глобальной системой координат, что требует их преобразования. На рис. 2 показано, что ось 1, направленная вдоль волокон, составляет угол θ с осью x. При этом в случае поворота системы координат преобразование тензора напряжений второго ранга имеет следующий вид:

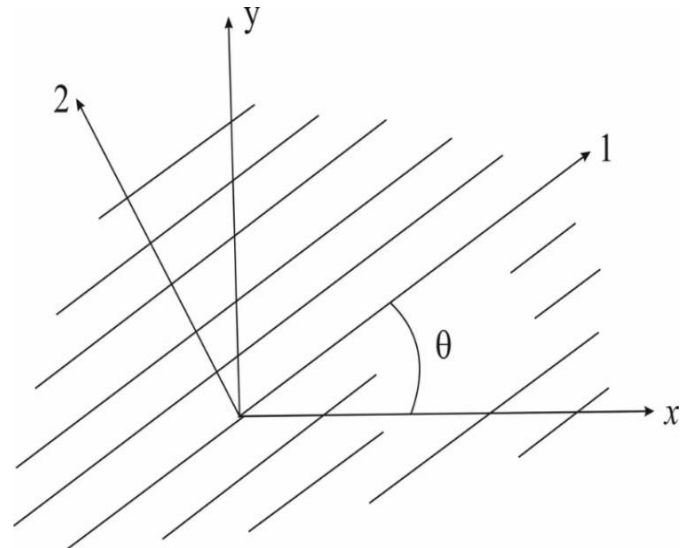


Рис. 2. Поворот главных осей однонаправленного материала относительно осей детали x, y

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2 \cdot s \cdot c \\ s^2 & c^2 & 2 \cdot s \cdot c \\ s \cdot c & -s \cdot c & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $s = \sin(\theta)$, $c = \cos(\theta)$.

Упругие свойства однонаправленных композитов также зависят от объемной доли волокон и от упругих свойств компонентов. Исходя из двух гипотез о равенстве в компонентах (в волокнах и матрице) продольных деформаций, с одной стороны, и поперечных и сдвиговых напряжений, с другой стороны, упругие свойства однонаправленных композитов можно оценить по следующим формулам:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{1f} \cdot V_f + E_{1m} \cdot (1 - V_f); E_2 = E_{2f} \cdot E_{2m} / (E_{2m} \cdot V_f + E_{2f} \cdot (1 - V_f)); \\ G_{12} &= G_{12f} \cdot G_{12m} / (G_{12m} \cdot V_f + G_{12f} \cdot (1 - V_f)); \\ \mu_{12} &= \mu_{12f} \cdot V_f + \mu_{12m} \cdot (1 - V_f), \end{aligned} \quad (5)$$

где E_{1f} , E_{2f} и G_{12f} – модули Юнга, модуль сдвига волокна, E_{1m} , E_{2m} и G_{12m} – модули Юнга, модуль сдвига матрицы, μ_{12f} и μ_{12m} – к-ты Пуассона для волокна и матрицы, принимающиеся изотропными, а V_f – объемная доля волокон.

Вариант критерия прочности

Учитывая факт направленного характера разрушения композита волокнистого типа, имеет смысл принять условием прочности некоторое предельное соотношение между напряжениями. Последние при этом функционируют именно в плоскости возможного разрушения. Кроме этого, одно из направлений армирования будет включать в себя именно данная плоскость.

Соответственно, в случае если σ_n и τ_n – нормальный и касательный тип напряжения, то условие прочности будет иметь следующий вид:

$$\Phi(\sigma_n, \tau_n) = 1. \quad (6)$$

Для данных пластиков характер растяжения характеризуется совершенной определенностью. В связи с этим имеет смысл применение условия (6). Данное условие поставлено на одной из двух площадок, которые взаимно перпендикулярны друг другу. Также они содержат волокна одного из семейств армирования. Заметим, что простейшим предположением о виде функции Φ в (6) будет линейность. Тогда на одной (n_1) или другой (n_2) плоскости разрушения могут быть выписаны следующие критерия (плоскость здесь связана с направлением волокон какого-либо ортогонального семейства):

$$\sigma_{n_1} + m_1 \tau_{n_1} = \sigma(0) = c_1; \quad (7)$$

$$\sigma_{n_2} + m_2 \tau_{n_2} = \sigma(90) = c_2. \quad (8)$$

В связи с этим зависимости прочности $\sigma(\varphi)$ от угла вырезки образца φ примут вид (выведено из критериев (6) и (7)):

$$\sigma(\varphi) = \frac{c_1}{\cos^2 \varphi + m_1 \sin \varphi \cos \varphi} \text{ при } \varphi \leq \varphi^*; \quad (9)$$

$$\sigma(\varphi) = \frac{c_2}{\sin^2 \varphi + m_2 \sin \varphi \cos \varphi} \text{ при } \varphi > \varphi^*. \quad (10)$$

Рисунок 3 (а именно сплошные линии) демонстрирует факт достоверности описания зависимостью (9) изменения прочности армированных ортогональных пластиков, которое наблюдается в случае растяжения под углами от 0° до 45° изменение прочности армированных пластиков ортогонального типа.

Для пластиков «равнопрочного» характера (т. е. при 0/90), когда число слоев N_1 и N_2 одинаково в двух ортогональных направлениях, то считаем $c_1 = c_2$, $m_1 = m_2$ и $\varphi^* = 45^\circ$. Здесь (9) и (10) отражают зависимость прочности от угла, симметричную относительно угла в 45° : $\sigma(\varphi) = \sigma(90^\circ - \varphi)$ (рис. 4, в).

Если N_1 и N_2 не являются равными, то примем прочности вдоль волокон пропорциональными количеству слоев: $c_1 / c_2 = N_1 / N_2$. И если при этом также сдвиговая прочность вдоль волокон c_1 / m_1 либо c_2 / m_2 имеет невысокую зависимость от числа слоев (то есть речь идет о прочности, которая является «почти» прочностью полимерной матрицы), то $m_2 / m_1 = c_1 / c_2 = N_1 / N_2$, и соответственно, окажется, что для армирования ортогонального типа известной структуры (когда известно количество слоев N_1 , N_2) всю немонотонную зависимость прочности от направления растяжения существует возможность описать на основании всего двух экспериментов (рис. 4, г), к примеру, для углов вырезки, равных нулю и 45° .

Рисунок 5 содержит в себе данные для углепластика (см. рис. 3), нанесенные в координатах $\sigma_n = \sigma(\varphi) \cos^2 \varphi$, $\tau_n = \sigma(\varphi) \sin \varphi \cos \varphi$. Заметим, что в данном случае прямая линия (7) в рассматриваемых координатах, которая приводит к зависимости (9), так же хорошо описывает эксперимент, как и участок эллипса

$$\left(\frac{\sigma_{n_1}}{\sigma(0)}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{n_1}}{\tau(0)}\right)^2 = 1. \quad (11)$$

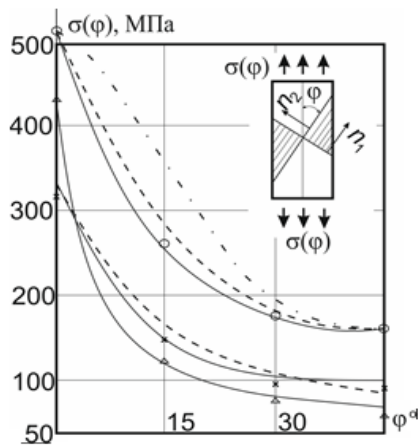


Рис. 3. Зависимости прочности пластиков ортогонального типа армирования от направления вырезки образцов: \times – углепластик; Δ – боропластик; \circ – стеклопластик; сплошные кривые – линейный критерий; штриховые – квадратичный; штрих-пунктирные – инвариантный

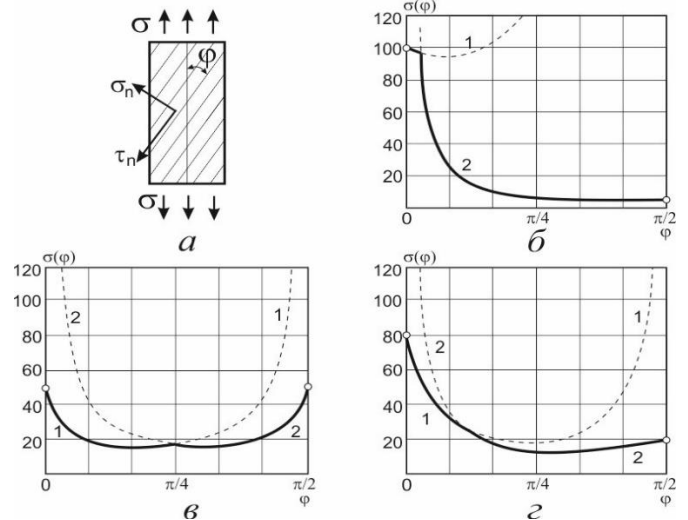


Рис. 4. Схема нагружения (а) и зависимости прочности композитов армирования ортогонального типа от направления вырезки образцов по двум линейным критериям прочности: 1 – (9); 2 – (10); б – однонаправленный КМ (0); в – «равнопрочный» (0/90); з – (0₄/90₁)

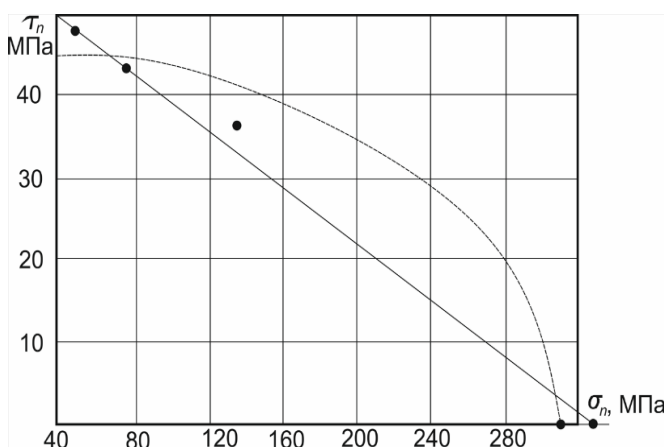


Рис. 5. Предельная кривая для углепластика (0/90) в координатах σ_n , τ_n

Подобные критерии прочности, которые принимают к учету направленное разрушение волокнистых композитов, дают возможность более верной интерпретации экспериментальных данные, а также производить для композитных элементов конструкций расчеты прочности.

Третья (основная) глава посвящена совершенствованию и разработке новых методов 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, таким как: послойный метод расчета напряжений для симметричных пар слоев; послойный упрощенный метод; оценка упругих свойств по С. Цаю; построение для пар слоев на основе критериев прочности в пространстве напряжений предельных поверхностей прочности; написание компьютерной программы с автоматизированным расчетом несущей способности баллона композитного типа для инженерной оптимизации структуры армирования.

Одна из наиболее простых моделей проектирования намоточных сосудов давления состоит в использовании «нитяной аналогии», для которой принято, что по всем волокнам напряжения равномерно распределены (рис. 6).

Средние напряжения по осевым $\bar{\sigma}_z$ и окружным $\bar{\sigma}_\theta$ направлениям можно рассчитать, как:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{pR}{2h}, \bar{\sigma}_\theta = \frac{pR}{h}. \quad (12)$$

В соответствии с данной моделью можно рассчитать минимально допустимую толщину h для баллона с определенными углами армирования. В случае достижения предела прочности σ_0 под действием критического давления p^* можно получить выражения из (12):

$$\frac{p^*R}{2\sigma_0} = \sum_{i=1}^m h_i \cos^2 \alpha_i; \quad \frac{p^*R}{\sigma_0} = \sum_{i=1}^m h_i \sin^2 \alpha_i. \quad (13)$$

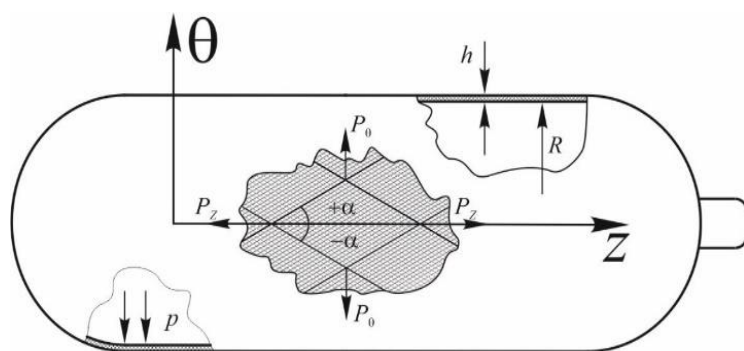


Рис. 6. Схема баллона и модель ромба из нерастяжимых волокон, уложенных под углами $\pm \alpha$ к продольной оси баллона

На рис. 7–9 отображены для разных пар слоев в пространстве напряжений предельные поверхности, а также приведены коэффициенты запаса для них при условно выбранном внутреннем давлении.

В качестве примера рассмотрена схема армирования пятью семействами пар слоев (А-структура), которые приведены в табл. 1. Изделие представляет собой баллон из стеклопластика.

Таблица 1. Армирование баллонов со структурами А, В и С. Количество слоев $N=28$; n_i – число пар слоев

i	$\pm \alpha_i, ^\circ$	n_i		
		А	В	С
1	16	2	0	0
2	18	4	4	2
3	52	2	2	2
4	63	2	2	2
5	90	4	6	4
1-С	49	0	0	4

Уравнения, составленные с целью построения предельных поверхностей в виде трех отрезков или эллипса:

1. Уравнения прямых линий 1, 2:

$$|\sigma_z \operatorname{tg} \alpha - \sigma_\theta \operatorname{ctg} \alpha| = \sigma_{45} \Rightarrow$$

$$1. \sigma_\theta = t^2 \sigma_z + t \sigma_{45};$$

$$\text{при } \sigma_z < \operatorname{tg} \beta^* \sigma_\theta; \operatorname{tg} \beta^* = \operatorname{tg}^2 \alpha = t^2$$

$$2. \sigma_\theta = t^2 \sigma_z - t \sigma_{45};$$

$$\text{при } \sigma_z > \operatorname{tg} \beta^* \sigma_\theta; \operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_z}.$$

2. Уравнение прямой 3 (15).

$$t^2 \sigma_\theta + \sigma_z = \sigma_0 (1 + t^4) (1 + t^2)^{-1}. \quad (15)$$

3. Уравнение эллипса 4 (16).

$$t^2 \sigma_z^2 + t^{-2} \sigma_\theta^2 - \sigma_z \sigma_\theta \left(2 - \frac{\sigma_{45}^2 (1 + t^2)^2}{t^2 \sigma_0^2} \right) = \sigma_{45}^2; \quad t = \operatorname{tg} \alpha. \quad (16)$$

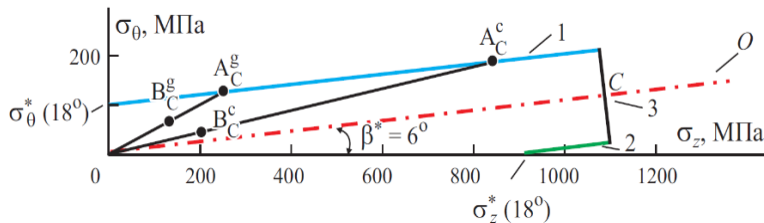


Рис. 7. Предельная поверхность при двухосном растяжении для пары слоев $\pm 18^\circ$

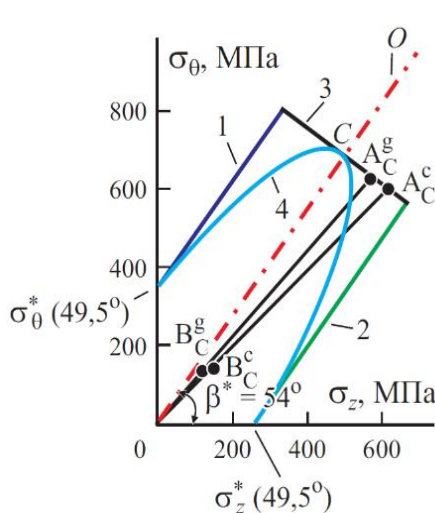


Рис. 8. Предельная поверхность для пары слоев $\pm 49.5^\circ$; прямые 1, 2 – условия перекашивания ромба (см. рис. б); прямая 3 – условие разрыва волокон; 4 – эллипс

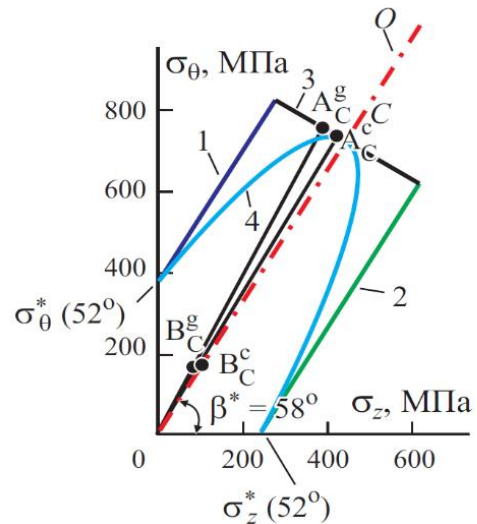


Рис. 9. Предельные поверхности для пары слоев $\pm 52^\circ$

Для исходной А-структуры (табл. 1) приведены в таблице 3.15 коэффициенты запаса, которые должно сильно зависят от значений углов. Следовательно,

выбранная модель армирования не является подходящей. Далее для подтверждения этого разберем нитяную модель, в которой из (12) было показано, что для средневзвешенных квадратов синусов (SIN) и косинусов (COS) будет верно:

$$2 \sum_{i=1}^m n_i \cos^2 \alpha_i = \sum_{i=1}^m n_i \sin^2 \alpha_i \Rightarrow \frac{SIN}{COS} = 2; \quad (17)$$

$$\text{для } A \Leftrightarrow \frac{SIN}{COS} = \frac{\sin^2 16^\circ + 2\sin^2 18^\circ + \sin^2 52^\circ + \sin^2 63^\circ + 2}{\cos^2 16^\circ + 2\cos^2 18^\circ + \cos^2 52^\circ + \cos^2 63^\circ} \approx 1.11 \ll 2??!$$

Заметим, что простое изменение числа пар слоев, имеющих различную ориентацию, способно исправить ситуацию.

Способ 1. В-структура. Предлагается вносить изменения в соотношения между числами пар слоев при других неизменных параметрах. Исходя из того, что при $63^\circ > 55^\circ = \alpha^*$ пары слоев перегружены, а слои $16^\circ < \alpha^*$ недогружены, сделаем замену 16° на слои 90° . После замены будет лучше достигаться условие оптимальности (17):

$$\frac{2\sin^2 18^\circ + \sin^2 52^\circ + \sin^2 63^\circ + 3}{2\cos^2 18^\circ + \cos^2 52^\circ + \cos^2 63^\circ} \approx 1.92 \approx 2 !!$$

Далее поиск требующегося числа x заменяемых пар слоев удобно производить на основе следующего несложного уравнения (здесь 16° и 18° объединены для краткости):

$$\frac{(6-x)\sin^2 18^\circ + 2\sin^2 52^\circ + 2\sin^2 63^\circ + (6+x)}{(6-x)\cos^2 18^\circ + 2\cos^2 52^\circ + 2\cos^2 63^\circ} = 2 \Rightarrow$$

$$x = 2.13 \approx 2.$$

Замена 16° на 90° в результате предлагает структуру с оптимальными параметрами. Более того, для достижения лучшего результата в проектировании есть возможность изменения углов намотки и модулей упругости. Кроме этого, осуществление выбор из органических, углеродных или стеклянных волокон помогает в распределении напряжения и достижении между разными слоями близких коэффициентов запаса.

Способ 2. С-структура. Для расчета по (17) возьмем угол армирования ψ с сохранением других углов ориентации, тогда выражение преобразуется:

$$\frac{2\sin^2 \psi + \sin^2 18^\circ + \sin^2 52^\circ + \sin^2 63^\circ + 2}{2 - 2\sin^2 \psi + \cos^2 18^\circ + \cos^2 52^\circ + \cos^2 63^\circ} = 2 \Rightarrow$$

$$\sin^2 \psi = 0.5782; \quad \psi = 0.864 \approx 49.5^\circ.$$

Для создания оптимальной равнонапряженной структуры можно не только путем изменения числа слоев, но и аккуратным подбором угла, что представлено в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты запаса при внутреннем давлении $p = 10$ МПа и критическое давление трех структур армирования стеклопластикового баллона (g) и углепластикового баллона (c)

$\pm\alpha^\circ$	$\pm 16^\circ$	$\pm 18^\circ$	$\pm 49.5^\circ$	$\pm 52^\circ$	$\pm 63^\circ$	90°	p^*	%
структура								
<i>A-g</i>	1.2	1.4	-	3.8	3.8	2.3	12	100
<i>B-g</i>	-	1.7	-	4.0	4.4	2.1	17	141
<i>C-g</i>	-	1.7	4.3	4.0	4.4	2.1	17	142
<i>A-c</i>	3.2	3.6	-	4.0	3.6	5.9	32	267
<i>B-c</i>	-	3.9	-	4.3	4.3	5.0	39	325
<i>C-c</i>	-	4.0	4.3	4.3	4.3	5.1	40	333

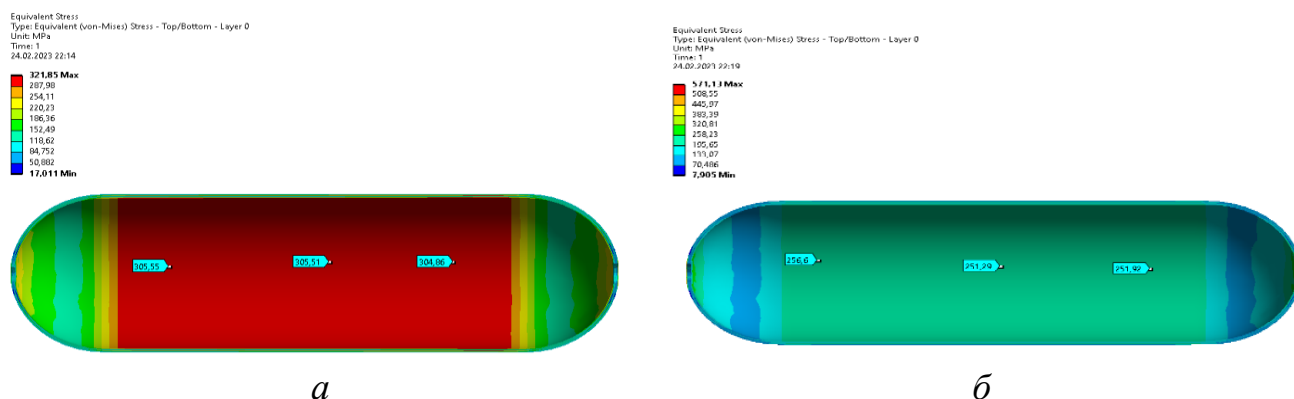
Здесь для каждой пары слоев построены предельные поверхности с помощью критериев прочности, которые учитывают разные механизмы разрушения. Также обеспечено повышение расчетного критического давления в баллоне, предназначенном для сжатого газа, на 41% с целью достижения равнонагруженности всех пар слоев,

Использование нитяной модели может быть очень выгодным для высокомодульных волокон из углепластика, что видно из табл. 2. Данный эффект достигается за счет схожести поведения композита с нитяной моделью при увеличении продольного модуля упругости. В этой модели матрица не берет на себя нагрузку, и ее роль по сравнению с волокнами незначительна.

Было показано, что прямая 3 отвечает за разрыв волокон, и при оптимизации структуры она пересекает луч нагружения, поэтому получается, что волокна начинают перераспределять нагрузку более согласованно, что вызывает повышение критического давления композита.

Было показано, что для волокон из углепластика нитяная модель достаточно эффективна при использовании ее для оптимизации свойств армированных структур. Данный подход позволяет достичь более высоких механических свойств и повысить критическое давление разрушения.

На рис. 10 представлены результаты расчета напряжений и полей перемещений композитного сосуда давления для *A*, *B* и *C*-структуры – методом конечных элементов.



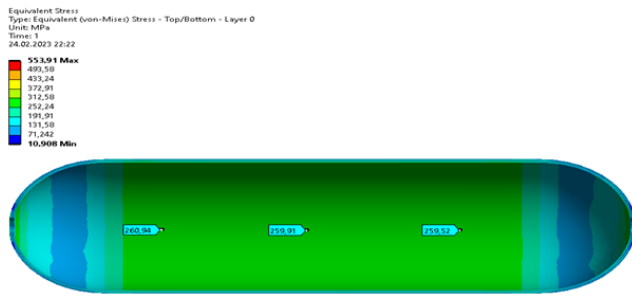


Рис. 10. Применяемые для пар слоев окружные и продольные напряжения для реальной А-структуры армирования (а), В-структуры (б) и С-структуры (в)

б

Самый простой способ обработки экспериментальных данных состоит в проведении через точки на осях двух прямых линий под оптимальным углом β^* , а через точку на оптимальном луче – перпендикулярного оптимальному лучу отрезка. Так и сделано на рис. 3 для верификации экспериментальных данных (рис. 11-12). Применение метода наименьших квадратов не дает существенного уточнения положения прямых 1-2-3.

Простая модель ромбической ячейки приводит к кусочно-линейной предельной поверхности, хорошо согласующейся с экспериментами. Предлагаемый подход позволяет решать задачу рационального проектирования структуры армирования по условию равенства коэффициентов запаса для всех пар слоев.

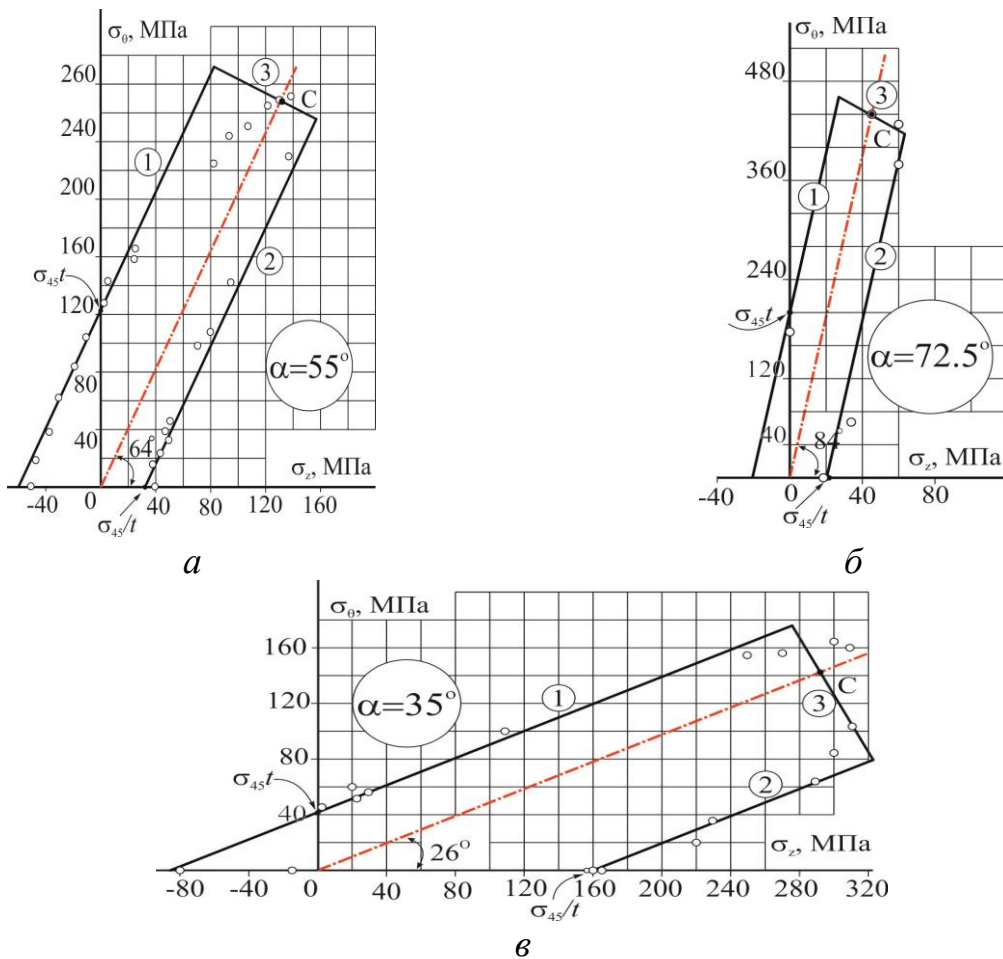


Рис. 11. Предельные поверхности в случае стеклопластиковых труб при двухосном нагружении: с намоткой $\pm 55^\circ$ – (а), $\pm 72,5^\circ$ – (б), $\pm 35^\circ$ – (в)

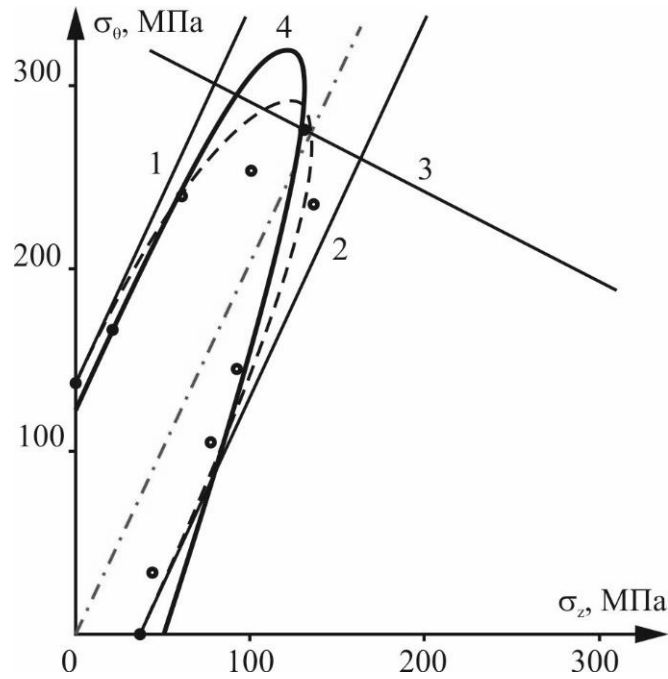


Рис. 12. Сравнение описания экспериментальных данных с рис. 11 для $\pm 55^\circ$:
 три отрезками 1-2-3; эллипсом по трем точкам (по двум значениям прочности $\sigma_{45}; \sigma_0$) -- штриховая линия; эллипсом по методу наименьших квадратов –
 сплошная линия

Исходя из построенных на рис.11 кусочно-линейных предельных поверхностей, значения для $\sigma_{45}; \sigma_0$ сильно различаются (табл. 3). Соответственно, это сигнализирует как о разбросе экспериментальных данных, так и о приближенности принятых гипотез.

Таблица 3. Оценки базовых значений прочности $\sigma_{45}; \sigma_0$, полученные из обработки данных для труб с разной намоткой

$\pm\alpha^\circ$	$tg^2\alpha = tg\beta$	β°	$\sin^2\alpha$	$\cos^2\alpha$	$\approx \sigma_{45}, \text{МПа}$	$\approx \sigma_0, \text{МПа}$
$\pm 55^\circ$	2	64	2/3	1/3	60–80	230
$\pm 35^\circ = \pm(90^\circ - 55^\circ)$	1/2	26	1/3	2/3	60–100	240–250
$\pm 72.5^\circ$	10	84	0.909	0.0905	65	370
$\pm 30^\circ$	1/3	18	1/4	3/4	300	1000
$\pm 60^\circ$	3	72	3/4	1/4	300	1000

Рис. 13. Интерфейс программы по автоматизированному расчету несущей способности композитного баллона для быстрой оптимизации структуры армирования

Значения коэффициентов безопасности для различных сечений контура оптимального баллона:

$$f_{\sigma}(r) = \frac{\bar{p}}{p_{\sigma}} = \frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_2} \frac{E_2 \sqrt{1 - \bar{r}_0^2}}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} \frac{\Delta_{\sigma}}{\Delta};$$

$$f_{\tau}(r) = \frac{\bar{p}}{p_{\tau}} = \frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\tau}_{12}} G_{12} \sqrt{1 - \bar{r}_0^2} \frac{\Delta_{\tau}}{\Delta},$$
(18)

где f_{σ}, p_{σ} – коэффициент безопасности и эксплуатационное давление, соответствующие первому условию прочности; f_{τ}, p_{τ} – коэффициент безопасности и эксплуатационное давление, соответствующие второму условию прочности; \bar{p} – разрушающее давление.

Так как баллон является равнопрочным только при нагрузках, близких к разрушающим, для определения коэффициента безопасности необходимо установить зону появления первых трещин в связующем композиционного материала. При этом в качестве коэффициента безопасности баллона принимается максимальное значение f , получаемое из равенств (18).

Для верификации результатов расчета напряженно-деформированного состояния композитного сосуда давления проанализированы данные классиков В.В.Васильева, И.Ф.Образцова, В.А.Бунакова. Для рассмотренного баллона с несущим слоем стекло- и углепластика и различными соотношениями толщин герметизирующего и армирующих слоев, а также различными радиусами полюсного отверстия коэффициент безопасности показан на рис. 14–15.

В рамках диссертационного исследования разработана компьютерная программа, написанная на языке Python, для выбора рациональной структуры армирования с учетом деградации свойств слоев в процессе докритического разрушения путем подбора по нитяной аналогии с последующей проверкой послойным методом (интерфейс программы представлен на рис. 13).

Сопоставление результатов расчета экспериментальных исследований НДС композитного сосуда баллона с армированием слоями из стекло- и углепластика, соответственно представлено на рис. 14-15.

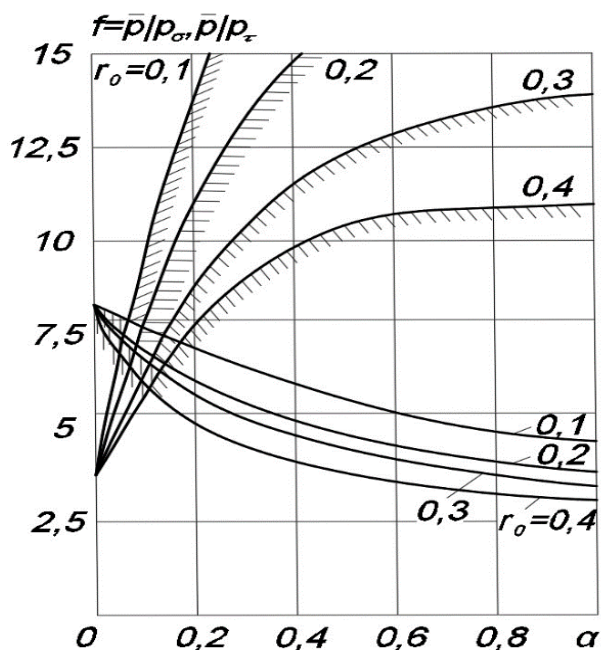


Рис. 14. Диапазон максимальных значений коэффициента безопасности комбинированного баллона с армирующим слоем стеклопластика

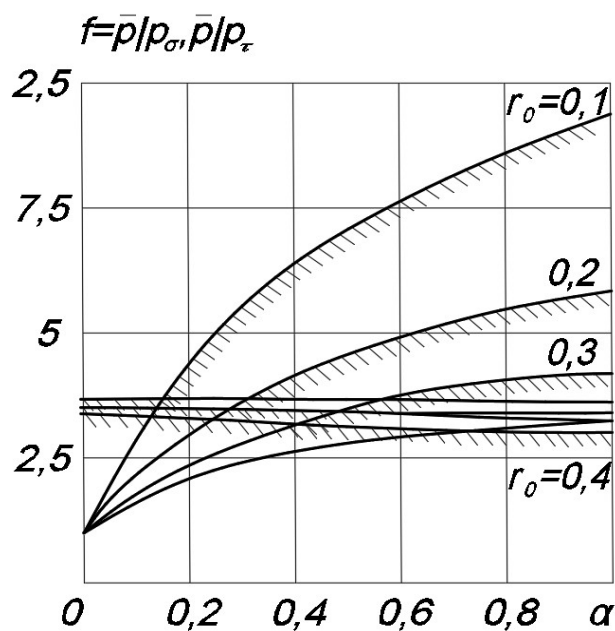


Рис. 15. Диапазон максимальных значений коэффициента безопасности комбинированного баллона с армирующим слоем углепластика

Для создания наиболее надежного изделия с заданным радиусом полюсного отверстия, необходимо учитывать соотношение толщин между герметизирующим и несущими слоями, чтобы обеспечить минимальное значение коэффициента безопасности. Это принципиально важно для обеспечения безопасности и функциональности таких изделий. При этом минимальная величина коэффициента безопасности для высокомодульного материала, как и следовало ожидать, оказывается существенно меньше, чем для стеклопластика.

Четвертая глава посвящена анализу 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. При этом наличие характерной толщины отслаиваемого слоя, соответствующей минимальному критическому напряжению, может быть объяснено с помощью энергетического критерия выщелкивания слоя. Он также позволяет рассчитать критические размеры технологических дефектов, типа непроклеев, и определить наиболее опасную глубину их расположения в композитной конструкции.

Расчеты по энергетическому критерию могут быть использованы совместно с результатами неразрушающего контроля для определения критических размеров в зависимости от расположения дефектов. Это позволяет повысить безопасность

композитных труб и цилиндрических сосудов давления и предсказать их поведение при потере устойчивости сжимаемых слоев.

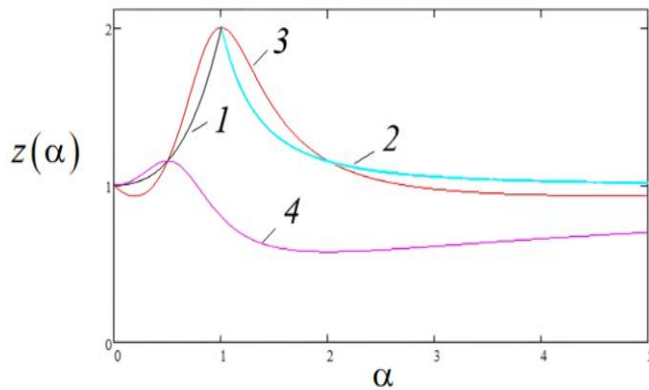


Рис. 16. Зависимости z (критической деформации) от отношения напряжений α :

$$1 - z_1 = \frac{2n}{2-\alpha} \sqrt{1-\alpha+\alpha^2}, \quad 2 - z_2 -$$

$$\frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = \frac{2\alpha-1}{2\sqrt{1-\alpha+\alpha^2}} = \frac{1}{z_2} (=1 \text{ при } \alpha = \infty),$$

$$3 -$$

$$z_3 = \frac{4(1-\alpha+\alpha^2)^{3/2}}{(1+\alpha)(4-7\alpha+4\alpha^2)} \leftrightarrow z_3 = 1 \text{ при } \alpha = 0; \infty$$

$$, 4 - z_4 = \frac{4(1-\alpha+\alpha^2)^{3/2}}{4\alpha^3+3\alpha^2-6\alpha+4} \left(= 1 \leftrightarrow \alpha = \begin{matrix} 0 \\ \infty \end{matrix} \right)$$

изготовленных из армированного типа пластиков с выщелкиванием слоев под действием сжимающих напряжений. Введение в критерий удельной работы расслоения с размерностью, отличной от размерности напряжений, дало возможность определения характерного размер выщелкиваемого слоя, а также описания масштабного эффекта: зависимости критических напряжений от абсолютных размеров композитного элемента. Наконец, в зависимости от глубины расположения непрочное оно позволило оценить их критические размеры (рис. 18).

При выщелкивании слоя толщиной h критическое напряжение может быть найдено следующим образом:

$$\frac{\sigma_c^2}{E^2} = \frac{h^2}{3R^2} g(m) + \frac{2\gamma}{Eh}. \quad (19)$$

Предельная деформация при двухосном растяжении возникает в начале процесса неустойчивого деформирования, однако важно помнить, что при двух- и в особенности трехосном растяжении появляются затруднения с возникновением пластических деформаций (к примеру, вблизи вершины трещины), что в итоге способно вызвать снижение трещиностойкости (вязкости разрушения), а также рост вероятности разрушения и по более опасному механизму – имеется в виду рост хрупкой трещины в отличие от возникновения неустойчивого деформирования.

Энергетический критерий дает возможность произведения оценки критических напряжений в случае расслоения труб и плоских элементов (рис. 17),

Первый член в (19) растет с увеличением толщины, второй, напротив, убывает (рис. 18). Из зависимости (19) можно оценить толщину h^* , которая будет соответствовать минимальному критическому напряжению σ_{\min} (рис. 19):

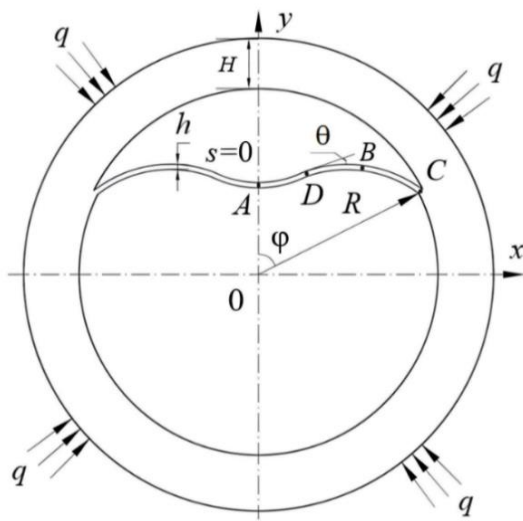


Рис. 17. Форма изгиба внутреннего слоя после расслоения с выщелкиванием

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_c}{dh} = 0 &\Rightarrow \frac{2h}{3R^2} g(m) = \frac{2\gamma}{Eh^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow h^* &= \left(\frac{3R^2\gamma}{Eg} \right)^{1/3} \Rightarrow \\ \sigma_{\min} &\approx 1.8 \left(\frac{E^2\gamma}{R} \right)^{1/3}; \\ g(m) &\approx 2.52 \div 2.58. \end{aligned} \quad (20)$$

Исходя из реальных упруго-прочностных характеристик были оценены близкие к реальным значениям толщины полоски, при которой получают минимальные значения критического напряжения и напряжения при расслоении:

$$\begin{aligned} h^* &= \left(\frac{3R^2\gamma}{Eg} \right)^{1/3} \approx \sqrt[3]{\frac{3 \times 4 \times 10^{-2} \times 4 \times 10^3}{2.52 \times 4.5 \times 10^{10}}} \approx 1.6 \text{ мм}; \\ \sigma^* &= 1.8 \left(\frac{E^2\gamma}{R} \right)^{1/3} \approx 1.8 \sqrt[3]{\frac{45^2 \times 10^{21} \times 4}{0.2}} \approx 618 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (21)$$

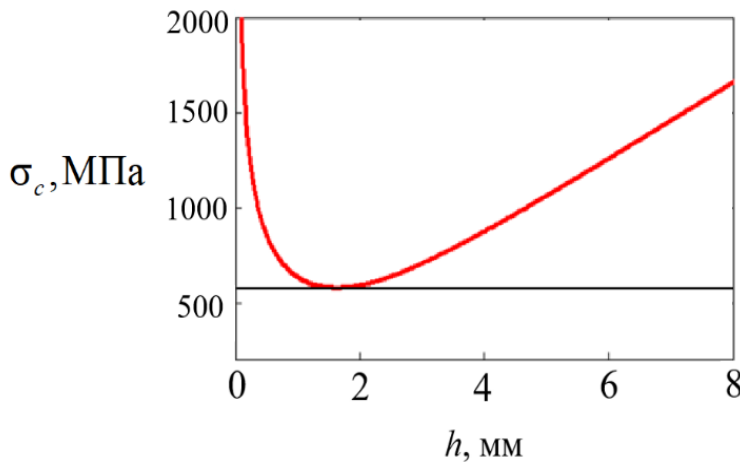


Рис. 18. Зависимость (19) критического напряжения от толщины слоя, выщелкиваемого с внутренней поверхности трубы

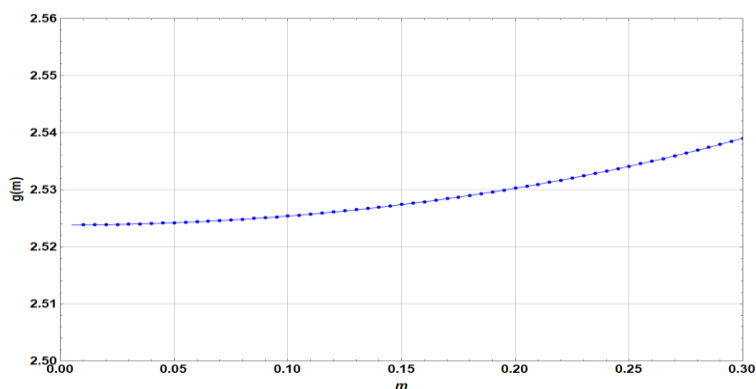


Рис. 19. Зависимость $g(m)$ при различных значениях m

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе диссертационной работы были обоснованы новые методы рационального проектирования структуры армирования композитных сосудов давления и получены следующие результаты:

- обоснованы упрощенные, инженерные методы расчета и оптимизации структуры армирования волокнистых композитов, в частности, намоточных труб и сосудов давления;

- для определения прочности композитных элементов конструкций предлагается учитывающие направленный характер разрушения волоконных материалов критерии, что дает более точную интерпретацию результатов проводимых экспериментов по сравнению с традиционными методами, основанными на тензорно-полиномиальных критериях, которые для пространства напряжений описывают гладкие предельные поверхности;

- разработана новая методика, дающая возможность решения обратной задачу подбора армирования равнонапряженной структуры, используя для пар слоев нитяную модель вместе с послойным методом. Это упрощает процесс вычислений и делает его более эффективным, нежели традиционные методы оптимального проектирования;

- рассмотрены примеры выбора для цилиндрической части баллона рациональной структуры армирования, которая дает возможность повышения расчетного критического давления газа в баллоне примерно на 40%;

- разработана компьютерная программа для выбора рациональной структуры армирования с учетом деградации свойств слоев в процессе докритического разрушения путем подбора структуры по нитяной аналогии с последующей проверкой послойным методом;

- проведен анализ внутренней потери устойчивости слоев в композитных сосудах давления, и оценены критическое напряжение и характерная толщина выщелкиваемого слоя, определяющая наиболее опасную глубину расположения расслоений;

- новая комплексная методика рационального проектирования структуры армирования использована на ряде предприятий при создании расчетных программ. Соответствующие акты внедрения представлены в качестве Приложения к диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Расчет предельных напряжений и проектирование рациональных структур армирования проще и надежнее проводить на основе анализа симметричных пар слоев, а не с помощью традиционного послойного метода для монослоев.

2. Полученные с помощью модели ромба из нерастяжимых волокон критерии прочности для пар слоев дают достаточно адекватную оценку критических давлений в намоточных, композитных баллонах.

3. С помощью использования инварианта «trase», который определяется для углепластиков отношением $\frac{E_1}{0,88}$, а для стеклопластиков $\frac{E_1}{0,71}$, можно с приемлемой точностью оценивать остальные упругие постоянные монослоя и пар слоев только через измеренный в эксперименте модуль упругости вдоль волокон E_1 .

4. Методология проектирования структуры армирования и оценки опасности дефектов типа расслоений должна включать анализ особых механизмов разрушения с помощью специальных энергетических критериев, включающих характеристики межслойной трещиностойкости композитов.

Рекомендации для дальнейшей разработки темы. 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.

ПЕРЕЧЕНЬ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ по специальности 1.1.8:

1. Полилов А.Н., Скворцов А.А., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.). Критерий возникновения неустойчивости деформирования тонкостенных пластин и оболочек при двухосном растяжении // Машиностроение и инженерное образование. 2023. № 1-2. С. 3-18. DOI 10.52261/18151051_2023_1-2_3.

2. Полилов А.Н., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.). Модели расслоения композитных пластин и сосудов давления с потерей устойчивости слоев // Машиностроение и инженерное образование. 2023. № 3. С. 9-22. DOI: 10.52261/18151051_2023_3_9

3. Полилов А.Н., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Татусь Н.А. Послойный метод расчета и критерии прочности композитных сосудов давления, намотанных симметричными парами слоев*. Часть 1. Особенности послойного

метода расчета композитной структуры из симметричных пар слоев // *Машиностроение и инженерное образование*. 2020. №3 (1). С. 21-30.

4. Полилов А.Н., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Татусь Н.А. Послойный метод и критерии прочности для композитных сосудов давления, намотанных симметричными парами слоев. Часть 2. Простые критерии прочности для двухосного растяжения косоугольно армированных труб // *Машиностроение и инженерное образование*. 2020. № 4(65). С. 14-25.

индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus:

5. Polilov A.N., Sklemina O.Yu. (Volkova O.Yu.). Delamination of composites and scale effect of glued joint strength // *Polymer Science. Series D*. 2023. Vol. 16. No 1. P. 104-110. DOI: 10/1134/S1995421223010240 (Scopus).

6. Polilov A.N., Sklemina O.Yu. (Volkova O.Yu.). Stability conditions of plastic deformation of thin-walled plates and shells under complex stress state // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 458. DOI: 10.1051/e3sconf/202345807010 (Scopus).

7. Polilov A.N., Sklemina O.Yu. (Volkova O.Yu.). Peculiarities of composite tubes structure design on the basis of thread model // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. No 6. P. 204-210. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_6_204 (Scopus).

8. Sklemina O.Yu. (Volkova O.Yu.), Tatus N.A., Polilov A.N. Design and strength estimation of composite multi-cavity pressure vessels // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1129. DOI: 10.1088/1757-899X/1129/1/012070 (Scopus).

9. Sklemina O.Yu. (Volkova O.Yu.), Tatus N.A., Polilov A.N. Analytical and finite element method of calculation of multishell gas tanks // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 747. No 1. DOI:10.1088/1757-899X/747/1/012131 (Scopus).

10. Sklemina O.Y. (Volkova O.Yu.), Polilov A.N. Method of structure reinforcement optimizing for composite gas tank // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2697. No 1. DOI: 10.1063/5.0136651 (WoS, Scopus).

11. Polilov A.N., Sklemina O.Yu. (Volkova O.Yu.), Tatus N.A. Design method of reinforcement structure with symmetric pairs of layers by the example of composite gas tank // *Mechanics of Composite Materials*. 2022. Vol. 57. No 6. P. 769-784. DOI: 10.1007/s11029-022-09998-x (WoS, Scopus).

12. Polilov A.N., Vlasov D.D., Sklemina O.Yu. (Volkova O.Yu.), Tatus N.A. Evaluation of the strength of a composite cylinder for compressed gas // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022. Vol. 51. No 1. P. 46-54. DOI: 10.3103/S1052618822010083 (WoS, Scopus).

13. Polilov A.N., Vlasov D.D., Sklemina O.Yu. (Volkova O.Yu.), Tatus N.A. Strength criteria of obliquely wound composite tubes under biaxial tension // *Strength of Materials*. 2022. Vol. 53. No 5. P. 765-774. DOI: 10.1007/s11223-021-00342-7 (Scopus, WoS).

14. Polilov A.N., Tatus N.A. Sklemina O.Yu. (Volkova O.Yu.). Tree etude problems on composite fuel gas tank // IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 525. DOI: 10.1088/1757-899X/525/1/012086 (WoS, Scopus).

в других изданиях РИНЦ:

15. Полилов А.Н., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.). Энергетический критерий адгезионного разрушения композитной трубы под действием внешнего давления // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 11. С. 41-48. DOI:10.31044/1813-7008-2023-11-41-48.

16. Власов Д.Д., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Поляков А.Э. Об упрощенных методах определения упругих постоянных слоистых полимерных композитов // Пластические массы. 2023. № 11-12. С.17-20.

17. Полилов А.Н., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.). Энергетический критерий расслоения композитов и масштабный эффект прочности клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. № 7. С. 21-28. DOI:10.31044/1813-7008-2022-7-21-28.

18. Полилов А.Н., Власов Д.Д., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Татусь Н.А. Оценка прочности композитного баллона для сжатого газа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 1. С. 57-67.

19. Полилов А.Н., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.). Особенности рационального проектирования структуры намотки композитных труб на основе «нитяной модели» // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6. С.204-210.

в материалах конференций:

20. Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Полилов А.Н. Рациональное проектирование структуры армирования композитных сосудов высокого давления // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Сборник тезисов докладов. 2023. С. 991-994. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-629.

21. Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Полилов А.Н. Методы испытаний плоских и трубчатых образцов из композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Сборник трудов XXXIV Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. 2022. С.74-82.

22. Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Полилов А.Н., Кутенев Н.Е. Метод оптимизации структуры армирования композитного сосуда для сжатого газа // Сборник трудов конференции: XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021). Москва. 2021. С. 168-176.

23. Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Татусь Н.А., Полилов А.Н. Аналитический и конечно-элементный анализ композитных многополостных баллонов для сжатого газа // Материалы Юбилейной LXX открытой международной студенческой научной конференции Московского политехнического университета. Москва. 2020. С.700-704.

в учебных пособиях:

24. Полилов А.Н., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Татусь Н.А. Механика композитов. Лабораторный практикум по дисциплинам «Механика композиционных материалов» и «Технологическая механика композитов». М.: 2022. 159 с.

25. Полилов А.Н., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Татусь Н.А. Механика разрушения. Лабораторный практикум по дисциплинам «Основы физики прочности и механика разрушения» и «Механика контактного взаимодействия и разрушения». М.: 2022. 128 с.

в монографиях:

26. Полилов А.Н., Власов Д.Д., Склемина О.Ю. (Волкова О.Ю.), Татусь Н.А. Нелинейные задачи изгиба (от Галилея до композита). М.: 2024. 458 с.