

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Волковой Ольги Юрьевны
на тему «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 выполненной работы. Диссертация О. Ю. Волковой посвящена расчету и проектированию композитных сосудов высокого давления. Сосуды давления являются одним из видов конструкций, в которых в полной мере могут быть реализованы высокие характеристики композитных материалов. В результате, композитные сосуды давления оказываются значительно легче металлических и широко применяются в авиации и ракетно-космической технике. Несмотря на то, что методы расчета и проектирования композитных сосудов давления уже достаточно хорошо развиты, существует ряд задач, решение которых является актуальным. К таким задачам относятся задачи устойчивости лайнера и внутренних слоев силовой оболочки при внешнем давлении, а также вопросы, связанные с расчетом прогрессивного разрушения композитной силовой оболочки с учетом разрушения связующего, рассматриваемые в работе. В связи с этим, диссертация О. Ю. Волковой представляется выполненной на актуальную и важную в теоретическом и прикладном отношении тему.

Структура и объем работы.

Структура работы отражает перечень задач, решенных в работе.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и перечень задач, которые необходимо решить для ее достижения, описана научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации результатов и публикациях по теме работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней автором приводится информация об областях применения композитных материалов и композитных сосудов давления, методах расчета и оптимизации композитных баллонов, описываются технологии изготовления композитных конструкций, применяемые для изготовления сосудов давления, в частности – метод намотки.

Вторая глава посвящена анализу напряженно-деформированного состояния многослойных композитных материалов. В разделе 2.1. приводятся основные соотношения теории упругости анизотропных композитов. В разделе 2.2 обсуждаются эффекты ползучести и релаксации, которые важны для сосудов давления, работающих в течение длительного времени. Раздел 2.3 посвящен критерием прочности сосудов давления, изготавливаемых методом намотки. Приводится критерий прочности, позволяющий описать разрушение многослойного композитного материала при растяжении образцов под углом к направлению укладки волокон. Раздел 2.4 посвящен механике роста расслоений и расщеплений при различных условиях нагружения.

Основными главами работы, в которых приведены наиболее важные результаты, являются третья и четвертая.

Третья глава посвящена расчету и оптимизации структуры композитных сосудов давления. В разделе 3.1. приведены расчеты композитного сосуда давления с различной структурой стенки методом конечных элементов. В разделе 3.2. описывается выбор оптимальных углов армирования при помощи «нитяной» модели композитного материала. Раздел 3.3 посвящен методам расчета композитных сосудов давления. Автором предложен метод расчета напряжений в многослойной композитной оболочке, основанный на анализе пар слоев. Также рассмотрены методы восстановления технических упругих констант с помощью инвариантов и разработана методика, позволяющая приближенно определить все упругие постоянные однонаправленного композитного материала по его продольному модулю упругости. В разделе 3.4.

автором предложены методы построения предельных поверхностей прочности в пространстве напряжений на основе критериев прочности для пар слоев. Для трех схем армирования баллона построены предельные поверхности для пар слоев с различными углами укладки волокон и определены предельные давления в баллоне, при которых начинается разрушение слоев. Проведено сопоставление полученных предельных поверхностей с экспериментальными данными. Также в рамках диссертационного исследования была разработана программа на языке Python для выбора рациональной структуры армирования с учетом последовательного разрушения слоев материала. В последнем разделе главы 3 рассмотрено деформирование композитной оболочки совместно с металлическим лейнером и получены соотношения, позволяющие определить оптимальное отношение толщин лейнера и оболочки в случае, когда предельная нагрузка на баллон определяется из условия разрушения связующего.

В четвертой главе рассмотрены задачи, связанные с потерей устойчивости композитных сосудов давления. В частности, рассмотрена задача о расслоении и потере устойчивости внутренних слоев композитной оболочки, нагруженной внешним давлением. Для определения характерных размеров отслаиваемого слоя был получен энергетический критерий выщелкивания при минимальном критическом напряжении. Данный критерий, более того, может быть применен не только для выявления критических размеров технологических дефектов (например, непроклеи), но и для расчета наиболее опасной глубины их залегания в композите. Полученные результаты могут также быть полезны при расчете устойчивости лейнеров композитных баллонов давления.

В заключении сформулированы выводы по работе.

Научная новизна полученных в работе результатов.

В диссертации получены следующие основные новые научные результаты.

1. Разработан более простой в применении по сравнению с традиционным послойным подходом метод расчета характеристик многослойного пакета,

основанный на использовании симметричных пар слоев.

2. Предложен новый метод определения рациональной структуры армирования намоточных сосудов давления, в рамках которого на первом этапе осуществляется расчет при помощи нитяной модели, а на втором – при помощи уточненного послойного метода оценки прочности многослойного пакета.
3. 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.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в разработке методов расчета и проектирования намоточных сосудов давления из композиционных материалов, которые могут быть применены в различных отраслях промышленности. Разработана методика построения предельных поверхностей разрушения слоев многослойного композитного материала. Разработана методика подбора рациональной структуры армирования силовой оболочки сосуда давления и разработано программное обеспечение, реализующее эту методику.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов подтверждается сравнением аналитических результатов, полученных при помощи разрабатываемых методик, с экспериментальными данными – результатами испытаний стеклопластиковых труб при двухосном нагружении и баллонов давления при внутреннем давлении.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены в докладах на четырех международных конференциях и форумах и одной всероссийской конференции.

Основные результаты опубликованы в 23 научных работах, включая 4 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ и

10 статей в журналах, индексируемых в международных базах Scopus / Web of Science.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

По содержанию диссертации имеются некоторые **замечания**:

1. Не вполне удачно сформулирован п. 2 научной новизны во введении. Там указано, что «разработана методика обеспечения роста расчетного критического давления по сравнению с той структурой, которая используется на практике для композитного баллона». Однако тут стоит говорить о методике определения рациональной структуры силовой оболочки в принципе, а не о том, что она позволила улучшить структуру конкретного баллона – это является лишь иллюстрацией применения разработанной методики.

2. В разделе 2.4 описывается механика расщепления композитных однонаправленных труб при кручении, однако такие трубы обычно не применяются для создания сосудов давления.

3. В разделе 3.1. приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния композитного сосуда давления методом конечных элементов, вызывающие ряд вопросов, в частности:

3.1. В работе отсутствует описание конечно-элементной модели. Неясно, как моделировалась многослойная структура силовой оболочки на цилиндрической части и на днищах.

3.2. Судя по рисункам 3.1-3.6 стенка баллона имеет постоянную толщину на днищах. В случае, если рассматривается баллон, изготавливаемый методом намотки, толщина силовой оболочки должна увеличиваться при приближении к полюсному отверстию.

3.3. Для композитной оболочки приведены эквивалентные напряжения по Мизесу. Данные напряжения не являются показательными для композитного материала. Было бы целесообразно привести напряжения в системе координат

слоев композитного материала (вдоль волокон, поперек волокон).

4. В главе 3 на стр. 95 указано, что путем изменения количества слоев получена структура «В» с оптимальными параметрами. Однако далее эта структура подвергается дальнейшему улучшению (изменяется не только количество слоев, но и углы), которое дает структуру «С». При этом полученная структура также не является равнопрочной (например, для баллона из углепластика согласно таблице 3.15 запас прочности слоя $\pm 18^\circ$ составляет 4,0, а слоя 90° - 5,1). Таким образом, существует возможность дальнейшего улучшения структуры и структуры «В» и «С» было бы правильнее называть не оптимальными, а рациональными.

5. В работе имеется ряд опечаток и редакционных недостатков, например:

5.1. Первая ссылка на рис. 3.16-3.19 находится на стр. 79, тогда как сами рисунки появляются на стр. 96. Было бы целесообразно представить рядом со страницей 79 схематичное изображение предельной поверхности с указанием прямых 1-3, либо сослаться на рис. 3.12, который находится значительно раньше.

5.2. Во втором абзаце на стр. 96 начало предложения не согласуется с окончанием.

5.3. На странице 107 имеется ссылка на рис. 3.22, вместо 3.23.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и могут быть учтены автором при проведении дальнейших исследований.

Заключение.

В целом работа О. Ю. Волковой выполнена на актуальную и практически важную тему, содержит новые результаты, обладающие теоретической и прикладной ценностью. В диссертации решена научная задача оценки прочности и устойчивости силовой оболочки и выбора рациональных параметров композитных сосудов, работающих под действием внешнего и

внутреннего давления. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 – п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в редакции от 25.01.2024), а ее автор, Волкова Ольга Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент, главный научный сотрудник АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», доктор технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки)



Азаров Андрей Валерьевич

Дата: 08.07.2024

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения». Адрес: Россия, 141371, Московская область, Сергиево-Посадский г.о., г. Хотьково, ул. Заводская, д.34. Телефон: +7 495 993-00-11, Факс: +7 496 543-82-94, e-mail: tsniism@tsniism.ru

Подпись Азарова Андрея Валерьевича заверяю

Секретарь НТС АО «ЦНИИСМ»



Г. В. Краснова