

На правах рукописи

ШПАКОВА ЮЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА

**СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И КОЛЕБАНИЯ ПОДКРЕПЛЕННЫХ  
ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов  
и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2007

Работа выполнена в Новокузнецком филиале-институте Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Каледин Валерий Олегович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
**Олегин Игорь Павлович**, Новосибирский  
государственный технический университет

кандидат технических наук, доцент  
**Жуков Иван Алексеевич**, Сибирский  
государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк

Ведущая организация: Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится «14» ноября 2007 г. в 15.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.269.01 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53-а.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2007г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212. 269.01,  
кандидат технических наук, доцент

Костюченко Т.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время приобрела актуальность проблема создания крупногабаритных силовых конструкций из полимерных композиционных материалов, испытывающих гидростатические и гидродинамические воздействия. Особенностью таких конструкций является неизбежное наличие технологических дефектов типа непроклеев и начальных расслоений, которые приводят к снижению прочности, жесткости и изменению динамических свойств. Учитывая высокую стоимость композиционных материалов, решение о возможности эксплуатации таких конструкций необходимо принимать на основе анализа влияния начальных дефектов на несущую способность и функциональные свойства при проектных нагрузках.

Несмотря на наличие большого опыта разработки и эксплуатации оболочечных конструкций из полимерных композиционных материалов, задача анализа влияния локальных несовершенств на механическое поведение остается недостаточно исследованной. В частности, нет исчерпывающих данных о влиянии на напряженное состояние технологических дефектов для их регламентации. Не решена задача гидроупругости подкрепленной слоистой анизотропной оболочки с произвольной структурой армирования, что не позволяет анализировать волновые эффекты в конструкции при обтекании её потоком жидкости.

Таким образом, представляется актуальным исследование механического поведения многослойных цилиндрических подкрепленных оболочек при гидростатических и гидродинамических воздействиях, что необходимо для рационального выбора конструктивных решений.

**Целью работы** является установление закономерностей влияния локальных несовершенств структуры на напряженно-деформированное состояние и колебания крупногабаритных слоистых подкрепленных цилиндрических оболочек из композиционных материалов для обеспечения их функциональных свойств при гидростатических и гидродинамических силовых воздействиях.

**Идея работы** состоит в расчетно-теоретическом анализе статического и динамического деформирования подкрепленных оболочек при варьировании физико-механических констант материалов, формы и размеров локальных дефектов для получения зависимостей действующих напряжений, предельных нагрузок, фазовых скоростей упругих волн и их амплитуд от конструктивных параметров, что позволяет выбирать их рациональные значения и регламентировать допустимые технологические дефекты.

### **Задачи исследования:**

- построить математическую модель деформирования, устойчивости и колебаний слоистых подкрепленных цилиндрических оболочек с начальными расслоениями;
- разработать и реализовать в виде вычислительных программ алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния, критических на-

грузок потери устойчивости слоистых подкрепленных оболочек при гидростатическом нагружении и их динамического деформирования при взаимодействии с обтекающей жидкостью;

- оценить достоверность расчетно-теоретических результатов путем сопоставления с точными решениями модельных задач и известными экспериментальными данными;

- провести параметрическое исследование несущей способности слоистых цилиндрических конструкций в зависимости от параметров расслоений;

- исследовать протекание волновых процессов в оболочке конечной длины, взаимодействующей с обтекающим потоком жидкости, в зависимости от параметров изгибной жесткости и демпфирования;

- сформулировать рекомендации по регламентации допустимых технологических дефектов и выбору рациональных конструктивных параметров, обеспечивающих требуемые динамические свойства корпусной конструкции.

**Методы исследования** основаны на использовании:

- известных положений теории слоистых подкрепленных оболочек для построения математической модели статического деформирования, устойчивости и колебаний крупногабаритных оболочечных конструкций;

- численных и численно-аналитических методов решения краевых задач для расчета напряженно-деформированного состояния, устойчивости и колебаний;

- вычислительной математики для решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений высокого порядка.

**Научные положения, защищаемые автором.**

- Модель деформирования и устойчивости подкрепленных оболочек с начальными расслоениями при гидростатических нагрузках, в которой оболочка и подкрепляющие шпангоуты предполагаются деформируемыми совместно, а начальные дефекты типа расслоений моделируются уменьшением изгибной жесткости пакета слоев в локальной зоне.

- Модель малых вынужденных колебаний вязкоупругих оболочек, обтекаемых потоком жидкости, в которой взаимодействие конструкции с потоком определяется связанной задачей гидроупругости.

- Закономерности влияния начальных расслоений на напряженно-деформированное состояние и устойчивость оболочек вращения из слоистых композиционных материалов.

- Результаты параметрического исследования вынужденных колебаний вязкоупругой оболочки, возбуждаемых на её кромке, и параметров бегущей волны при варьировании физико-механических характеристик материалов и воздействий.

**Обоснованность и достоверность научных положений и результатов** обеспечена корректным применением апробированных методов теории оболочек, строительной механики и теории колебаний; исследованием точности численного решения; согласованием результатов расчетно-теоретического исследования с точными решениями модельных задач и известными экспериментальными данными.

**Научная новизна работы** состоит в том, что:

- построена математическая модель деформирования и устойчивости многослойной цилиндрической оболочки с учетом начальных расслоений;
- построена математическая модель бегущей волны на поверхности цилиндрической оболочки при взаимодействии с обтекающим потоком жидкости;
- разработан алгоритм решения связанной задачи гидроупругости для оболочки вращения, обтекаемой потенциальным потоком жидкости;
- получены количественные зависимости параметров напряженно-деформированного состояния, критических нагрузок потери устойчивости и параметров бегущей волны от физико-механических свойств материалов и параметров расслоений;
- сформулированы рекомендации для рационального проектирования конструкций и регламентации технологических дефектов типа расслоений.

**Практическая значимость работы** заключается:

- в разработке инструментальных программных средств для параметрических исследований напряженно-деформированного состояния, устойчивости и колебаний многослойных цилиндрических конструкций при наличии начальных расслоений;
- в возможности использования полученных количественных оценок для регламентации технологических дефектов в корпусных конструкциях из слоистых композиционных материалов и подтверждена актами и справками об использовании результатов диссертационной работы в промышленности.

Работа выполнялась в соответствии с планом НИР Новокузнецкого филиала-института Кемеровского государственного университета, Государственным контрактом № 4546 и частично поддержана РФФИ (грант № 06-01-00004а).

**Реализация работы.** Результаты работы внедрены в Центральном научно-исследовательском институте специального машиностроения в 2007 г., в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН (г. Новосибирск) в 2007 г., что подтверждено актами и справками о внедрении. Часть результатов работы используется в учебном процессе при проведении лабораторного практикума по дисциплинам: «Численные методы решения краевых задач» и «Вычислительный эксперимент» для студентов специальности 010200 «Прикладная математика и информатика», а также в курсе научно-исследовательской работы студентов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждались на 15-й научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения (Новокузнецк, 2004 г.); на 7-й и 8-й Всероссийской научной конференции «Краевые задачи и математическое моделирование» (Новокузнецк, 2004 и 2006 г.); на V, VI, VII Региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов (Новокузнецк, 2005, 2006 и 2007 г.); на 5-й Всероссийской научно-практической конференции «Недра Кузбасса. Инновации» (Кемерово, 2006 г.); на XIII и XIV Международной

конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Москва-Алушта, 2005 и 2007 г.); на Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (Новосибирск, 2006); на V Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование» (Анжеро-Судженск, 2006 г.).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 21 печатных работ, включая 15 научных статей и 6 тезисов докладов на конференциях регионального и международного уровня; из них в рецензируемых периодических изданиях опубликованы 5 статей.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 151 наименований и 1 приложения. Общий объем диссертации без приложения составляет 118 страниц, в том числе 30 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования механического поведения цилиндрических подкрепленных оболочек из слоистых композиционных материалов с локальными несовершенствами структуры при гидростатических и гидродинамических нагрузках. Сформулированы цель и задачи исследования и защищаемые положения.

**В главе 1** приведен аналитический обзор известных результатов по проблеме обеспечения статической и динамической прочности пространственных корпусных конструкций из слоистых композиционных материалов.

Обеспечение статической и динамической прочности многослойных оболочек из композиционных материалов было предметом многочисленных исследований: наиболее значительный вклад в этой области внесли такие ученые, как Н. А. Алфутов, В. В. Болотин, В. В. Васильев, Г. А. Ванин, А. Н. Гузь, А. Я. Григоренко, Э. И. Григолюк, В. Н. Кобелев, Ю. В. Немировский и многие другие. В известных работах были построены теоретические основы статики, устойчивости и колебаний конструкций из армированных пластиков, установлены критерии прочности и устойчивости.

Однако механическое поведение пространственных конструкций из композиционных материалов при наличии начальных расслоений, подверженных гидростатическим и гидродинамическим силовым воздействиям, исследовано недостаточно для их рационального проектирования. Известные данные о влиянии технологических дефектов на напряженно-деформированное состояние и несущую способность неполны, а методы расчета конструкций из композиционных материалов с расслоениями недостаточно разработаны для прогноза снижения их несущей способности. Неизвестны количественные закономерности влияния параметров расслоений на критические нагрузки потери устойчивости и параметры колебаний и волн.

Поэтому для рационального проектирования крупногабаритных корпусных конструкций, содержащих подкрепленные оболочки из слоистых

композитов, актуальна разработка математических моделей деформирования, устойчивости и колебаний при наличии начальных расслоений и установление количественных закономерностей механического поведения при варьировании конструктивных параметров и физико-механических свойств материалов.

В главе 2 строится математическая модель деформирования, устойчивости и колебаний слоистой подкрепленной оболочки применительно к крупногабаритным корпусным конструкциям. Объект моделирования представляет собой тонкостенную оболочку вращения, подкрепленную поперечным силовым набором (рисунок 1). При изготовлении оболочки намоткой конструктивные элементы деформируются совместно, но между слоями в процессе полимеризации могут образовываться непрочные и ослабление адгезионной связи, что приводит к начальным расслоениям при незначительных нагрузках.

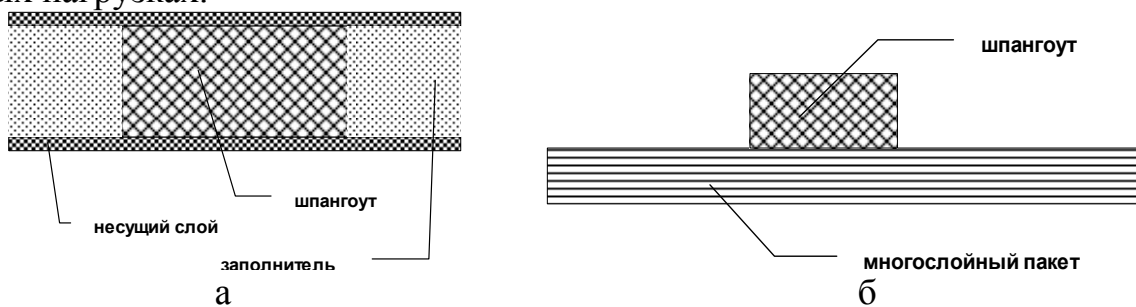


Рисунок 1 – Типовые структуры слоистых оболочек

Материал оболочки и шпангоутов предполагается физически линейным, а в докритическом напряженно-деформированном состоянии перемещения достаточно малы, чтобы можно было использовать геометрически линейную постановку задачи. Кроме того, для всего пакета оболочки справедливы гипотезы Кирхгофа-Лява, которые дают возможность известным образом выразить деформации в точке через деформации срединной поверхности, а их, в свою очередь, через перемещения срединной поверхности оболочки.

Физический закон ортотропного материала с учетом демпфирования примем в виде:

$$\sigma_{ij} = d_{ijkl} \varepsilon_{kl} + r \tau d_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений,  $d_{ijkl}$  – тензор упругости,  $r$  – коэффициент демпфирования,  $\varepsilon_{kl}$  – тензор деформаций,  $\dot{\varepsilon}_{kl}$  – тензор скоростей деформаций,  $\tau$  – масштаб времени.

Для описания движения оболочки при действии нестационарной нагрузки используем закон сохранения энергии:

$$\Pi + T = const, \quad (2)$$

где  $\Pi$  – потенциальная энергия,  $T$  – кинетическая энергия.

Дискретизация уравнения (2) на основе метода конечных элементов дает уравнение движения:

$$K\delta + R\dot{\delta} + M\ddot{\delta} = F(t), \quad (3)$$

где  $K = \int_V B^T D B dV$  – матрица жесткости,  $R = \int_V B^T D_s B dV$  – матрица демпфирования,  $M = \int_V B^T \mu B dV$  – матрица масс,  $\mu$  – матрица поверхностных плотностей,  $D$  – интегральная по толщине матрица упругости слоистого пакета,  $D_s$  – интегральная по толщине матрица демпфирования.

В частном случае стационарных нагрузок и стационарных полей перемещений уравнение (3) обращается в уравнение равновесия:

$$K\delta = F, \quad (4)$$

которое с учетом геометрической нелинейности деформирования известным образом преобразуется в уравнение критического равновесия

$$(K - \lambda G)\delta = 0, \quad (5)$$

где  $G$  – матрица геометрической жесткости.

Соотношения упругости, определяющие матрицу  $D$ , строятся в соответствии с общепринятыми теориями оболочек, в которых предполагается, что нормальные напряжения вдоль нормали к координатной поверхности отсутствуют. Моделирование начальных дефектов типа расслоений в оболочке производится за счет уменьшения изгибной жесткости пакета слоев в локальной зоне расслоения. Уменьшенная изгибная жесткость рассчитывается как суммарная жесткость независимо работающих слоев уменьшенной толщины, на которые разделяется пакет слоев. В результате изменяется матрица упругости для конечных элементов оболочки, попадающих в область расслоения. Варианты расположения расслоений по толщине пакета – одиночного, сдвоенного и множественного – приведены на рисунке 2.

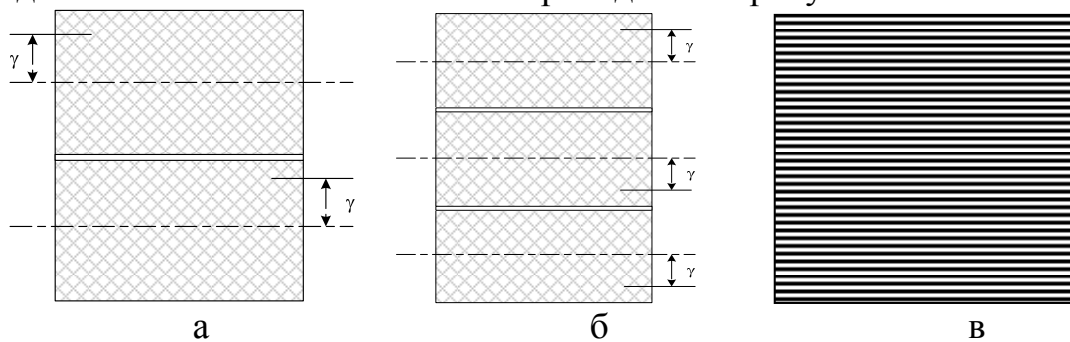


Рисунок 2 – Варианты расположения расслоений по толщине:

а - одиночное, б – сдвоенное, в - множественное

Таким образом, построенная дискретная модель позволяет анализировать статическое деформирование, устойчивость и малые вынужденные колебания подкрепленных оболочек из слоистых композиционных материалов. Уравнения (3)-(5) вместе с соответствующими граничными и начальными условиями являются основой для решения задач статики, устойчивости и динамики рассматриваемых конструкций с начальными расслоениями при действии гидростатических и гидродинамических нагрузок. Алгоритмы решения этих задач реализованы в пакетах прикладных программ на языке C++.



В главе 3 с использованием разработанных моделей, алгоритмов и программ проводится расчетно-теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния и устойчивости оболочек с начальными расслоениями при гидростатических нагрузках. Анализируется влияние размеров и расположения расслоений на напряженно-деформированное состояние и устойчивость многослойной цилиндрической оболочки.

Исследуемая конструкция представляет собой слоистую цилиндрическую оболочку из углепластика с различными углами армирования, подкрепленную шпангоутами, которая нагружается комбинациями внешнего давления и сжимающей силы. Подкрепляющие шпангоуты также выполнены из углепластика. На правом торце оболочки закреплены линейные перемещения вдоль образующей.

Рассматривались следующие варианты расположения расслоения в плане: кольцевое расслоение, примыкающее к шпангоуту, и кольцевое расслоение в середине отсека между шпангоутами; расслоение прямоугольной формы, примыкающее к шпангоуту, и расслоение прямоугольной формы на середине длины отсека (рисунок 3).

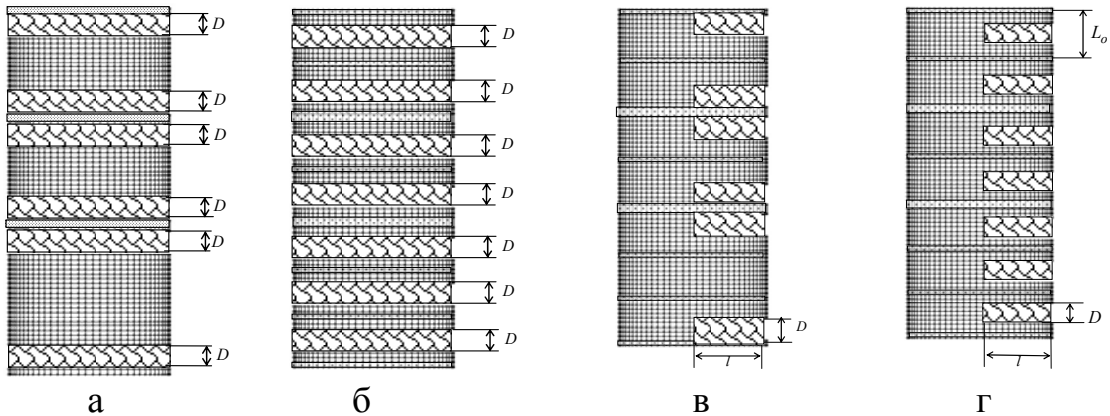


Рисунок 3 – Расположение ослабленных зон: а – кольцевое расслоение, примыкающее к шпангоуту; б – кольцевое расслоение на середине пролета; в – прямоугольное расслоение, примыкающее к шпангоуту; г – прямоугольное расслоение на середине пролета

При кольцевом расслоении исследовалась зависимость напряжений и критических нагрузок от длины ослабленной зоны по образующей  $D$ , которая варьировалась от одного конечного элемента до половины расстояния между промежуточными шпангоутами ( $L_0$  на рисунке 3,г). При расслоении прямоугольной формы исследовались зависимости от длины ослабленной зоны по образующей  $D$  и от ширины по окружности  $l$ . Продольный размер дефекта варьировался от одного конечного элемента до половины расстояния между шпангоутами, а размер по окружности – от 2,8% до половины сечения оболочки по окружности.

Напряжения в оболочке зависят от размеров и расположения расслоений. На рисунке 4,а приведены зависимости окружных напряжений от длины кольцевого расслоения, расположенного на середине пролета. При множественном расслоении напряжения увеличиваются уже при длине расслоения

0,1 пролета между соседними шпангоутами. В этих случаях максимальные окружные увеличиваются приблизительно на 53%. При прямоугольном расслоении (рисунок 4,б) окружные напряжения достигают максимального значения при ширине расслоения 22,8% длины окружности оболочки (рисунок 4,б). При сдвоенном и множественном расслоении окружные напряжения увеличиваются на 53% уже при длине расслоения, равной 10% расстояния между шпангоутами. Обращает на себя внимание характер зависимости напряжений от размеров расслоения: напряжения слабо меняются при росте размера до некоторой пороговой величины, затем быстро возрастают и при дальнейшем увеличении размера расслоения остаются практически неизменными.

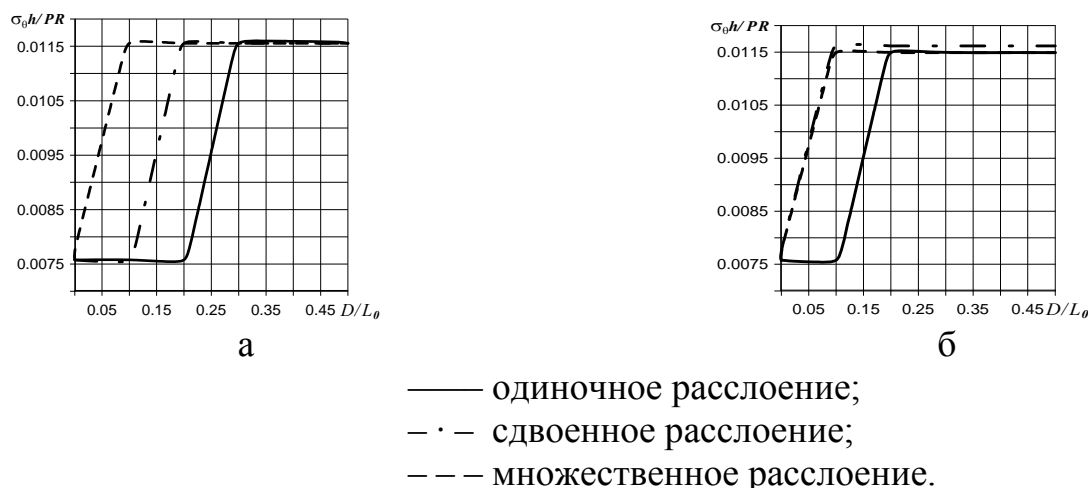


Рисунок 4 – Зависимость окружных напряжений от длины ослабленной зоны на середине пролета: а – кольцевое расслоение, б – прямоугольное

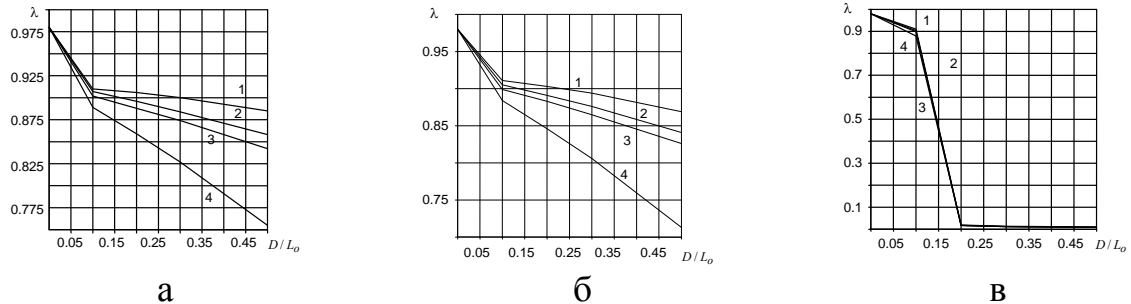
Полученные данные согласуются с известными результатами экспериментального определения несущей способности пластин с расслоениями, отличаясь от них не более чем на 10%.

В ещё большей степени ослабление оболочки сказывается на величине критических нагрузок потери устойчивости. На рисунке 5 показаны зависимости критических нагрузок от размеров прямоугольного расслоения. Величина  $\lambda = 1$  соответствует критической нагрузке оболочки без повреждений, кривые 1-4 соответствуют ширине ослабленной зоны: 1 – 2,8%, 2 – 8,6%, 3 – 22,8%, 4 – 50% длины окружности оболочки.

Эти зависимости показывают, что самым опасным является множественное расслоение, которое, независимо от ширины ослабленной зоны по окружности и от локализации ослабленной зоны – вблизи шпангоута либо на середине отсека между шпангоутами – приводит к местному смятию зоны расслоения. Критическая нагрузка уменьшается в 100 раз при длине ослабленной зоны, равной 20% от расстояния между соседними шпангоутами. Снижение критической нагрузки до величины не менее 0,9 расчетной достигается, если размеры ослабленных зон не превышают 10% расстояния между шпангоутами и 2,8% окружности оболочки.

Одиночное и сдвоенное расслоения вызывают близкое по величине снижение критической нагрузки, которое зависит как от длины, так и от ши-

рины ослабленной зоны. Максимальное снижение критической нагрузки до величин порядка 0,75 (т.е. на 30%) происходит при расслоении на длину 50% от расстояния между шпангоутами и на 50% длины окружности оболочки. Расслоения малой длины в середине отсеков между шпангоутами более опасны, чем расслоения, примыкающие к шпангоутам.



а – одиночное расслоение;  
 б – сдвоенное расслоение;  
 в – множественное расслоение.

Рисунок 5 – Зависимости критических нагрузок от длины ослабленной зоны в середине отсека между шпангоутами. Ширина ослабленной зоны: 1 – 2,8%, 2 – 8,6%, 3 – 22,8%, 4 – 50% длины окружности

В результате получены количественные зависимости параметров напряженно-деформированного состояния и критических нагрузок потери устойчивости от размеров и расположения расслоений и непроклеев.

Полученные результаты используются для регламентации допустимых технологических дефектов при проектировании машиностроительных конструкций. Поскольку несущая способность уменьшается с увеличением отношения длины дефекта по образующей к ширине по окружности, для безопасной эксплуатации конструкций с начальными расслоениями необходимо лимитировать не только площадь, но и размеры расслоения в плане.

В главе 4 рассматриваются колебания оболочки в обтекающем потоке жидкости. В случае подкрепленной неоднородной оболочки отражение волны от границы и от элементов подкрепления приводит к появлению стоячих волн. Поэтому выяснялись условия, при которых в оболочке конечной длины может возникать бегущая волна при действии на кромке силы, изменяющейся во времени по гармоническому закону.

Рассчет колебаний дает безразмерную фазовую скорость  $c_0$ , согласующуюся с известным решением дисперсионного уравнения бесконечно длинной оболочки только по порядку величины, но существенно иной

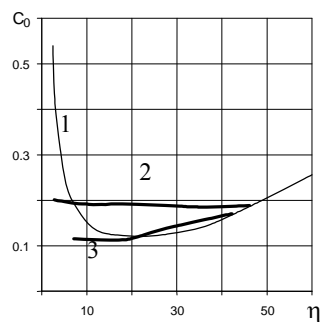


Рисунок 6 – Дисперсионные кривые тонкой оболочки: 1 – аналитическое решение для оболочки бесконечной длины, 2 – численное решение для оболочки длины 1 м при  $E_s = E_0$ , 3 – численное решение для оболочки длины 1 м при  $E_s = 10E_0$

формой дисперсионной кривой (рисунок 6).

Из рисунка видно, что с ростом волнового числа отражение волны от задней кромки сказывается сильнее. Так, при коэффициенте демпфирования 0,2 с. при волновом числе 50 и выше бегущая волна распадается из-за отражений, и колебания имеют довольно сложную картину, искаженную наличием стоячих волн.

Было замечено, что дисперсионные кривые для ортотропной оболочки зависят от соотношения модулей упругости. При равенстве модулей упругости не происходит дисперсии волн разной длины; в случае армирования преимущественно вдоль образующей более короткие волны распространяются с большей скоростью, поэтому форма и фаза негармонической волны будет изменяться вдоль образующей; коротковолновые колебания меньше затухают вдоль оси оболочки и больше подвержены отражению от задней кромки, что требует специального введения в конструкцию демпфера на задней кромке, который должен эффективно гасить короткие волны.

Фазовая скорость и длина затухания бегущей волны в трехслойной цилиндрической оболочке изменяются при наличии расслоений. Количественные оценки получены для тех же видов дефектов, которые рассматривались в статике, при варьировании изгибной жесткости ослабленной зоны (рисунок 7). Выявлено, что наличие мелких одиночных расслоений незначительно искажает волновую картину. Бегущая волна несколько тормозится в ослабленной зоне и не изменяет скорости за её пределами. При уменьшении жесткости от 2 до 4 раз снижается фазовая скорость в зоне расслоения и увеличивается скорость в неповрежденной зоне. Когда жесткость снижается в 10 и более раз, фазовые скорости в обеих зонах устанавливаются на постоянных уровнях: в неповрежденной зоне – в 2 раза выше, а в поврежденной – в 4-5 раз ниже, чем в полностью неповрежденной оболочке. Можно предположить, что при таком снижении жесткости (множественные расслоения) вместо волн изгиба в оболочке реализуются волны другого вида, в том числе связанные со сдвиговыми деформациями.

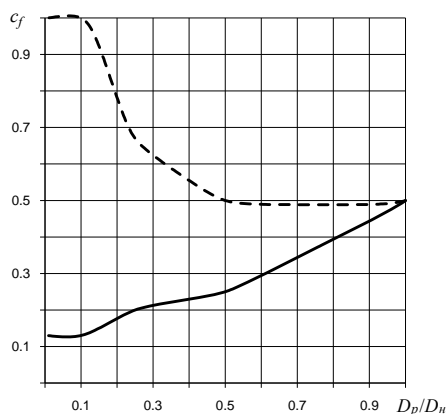


Рисунок 7 – Зависимости фазовой скорости от изгибной жесткости: сплошная линия – в поврежденной зоне, пунктир – в неповрежденной зоне

Уменьшение изгибной жесткости без изменения коэффициента демпфирования не приводит к распаду бегущей волны, что свидетельствует об отсутствии дополнительных отражений от границ ослабленной зоны.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Построена математическая модель деформирования, устойчивости и колебаний слоистых подкрепленных оболочек из композиционных материалов с начальными расслоениями, в которой наличие технологических дефектов имитируется снижением изгибной жесткости в локальной зоне расслоения или непрочлея, а материал несущих слоев и заполнителя обладает демпфирующими свойствами.

2. Разработаны и реализованы в пакете прикладных программ алгоритмы расчета статического деформирования, критических нагрузок потери устойчивости и малых свободных и вынужденных колебаний слоистых подкрепленных оболочек с локальными дефектами типа расслоений и непрочлеев при действии гидростатических нагрузок.

3. Разработан и программно реализован алгоритм решения связанной задачи гидроупругости слоистой подкрепленной оболочки вращения, в котором учитывается непостоянство по меридиану массовых, упругих и демпфирующих характеристик оболочки.

4. Достоверность результатов расчета напряжений подтверждена сопоставлением с известными экспериментальными данными о прочности пластин с непрочлеями. Различие по разрушающим нагрузкам не превысило 10%.

5. Путем параметрического исследования выявлено, что наиболее опасным является расположение расслоения на середине толщины пакета. Снижение несущей способности зависит как от площади дефекта, так и от соотношения его размеров в плане, причем при одинаковой площади несущая способность уменьшается с увеличением отношения длины дефекта по образующей к ширине по окружности (на 12% при длине, в 2 раза превышающей ширину, и на 6% - при длине 0,01 ширины).

6. При параметрическом исследовании бегущей волны выявлено, что фазовая скорость существенно зависит от коэффициента демпфирования (в 2 раза в исследованном диапазоне). Расслоения кольцевой формы приводят к уменьшению фазовой скорости в ослабленной зоне до 5 раз и одновременно увеличению фазовой скорости (до двух раз) в неповрежденной зоне, что может изменять картину обтекания оболочки потоком жидкости. Это позволяет рекомендовать увеличивать коэффициент демпфирования и снижать изгибную жесткость вблизи заднего торца оболочки для получения картины обтекания, выгодной для снижения гидродинамического сопротивления.

7. Полученные оценки снижения несущей способности и изменения параметров бегущей волны могут быть использованы для регламентации допустимых технологических дефектов в крупногабаритных корпусных конструкциях из слоистых композиционных материалов. При формулировке за-

ключения о прочности необходимо учитывать не только площадь, но и соотношение размеров ослабленной зоны.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аникина, Ю. В. Решение линейной задачи устойчивости слоистой оболочки при неосесимметричном докритическом состоянии / Ю.В. Аникина, С. В. Эптешева // V Региональная науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: Ч. 3. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2005. –С. 10-12.

2. Аникина, Ю. В. Моделирование устойчивости слоистой оболочки при неосесимметричном докритическом состоянии / Ю. В. Аникина, С. В. Эптешева // Материалы XIV Междунар. конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – М: Вузовская книга, 2005. –С. 37-39.

3. Аникина, Ю. В. Входной язык для описания трехмерных расчетных моделей в сеточных методах / Ю. В. Аникина // Недр Кузбасса. Инновации. Труды V Всероссийской научно-практической конференции. – Кемерово: ИНТ, 2006. – С. 95-96.

4. Аникина, Ю. В. Входной язык для описания пространственных конструкций / Ю. В. Аникина // VI Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2006. – С. 22-24.

5. Аникина, Ю. В. Численная модель для расчета прочности и устойчивости трехслойной ортотропной цилиндрической оболочки с легким заполнителем / Ю. В. Аникина, В.О. Каледин, Е.В. Решетникова, А.Ю. Марченко // Наука и технологии. Избранные труды Российской школы «К 70-летию Г. П. Вяткина». – М.:РАН, 2005. – С. 135-142.

6. Аникина, Ю. В. Исследование концентрации напряжений в сетчатых оболочках / Ю. В. Аникина, В. О. Каледин, Е. В. Решетникова, Т. В. Бурнышева // XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий. Краткие сообщения. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – С.29-31.

7. Аникина, Ю.В. Входной язык для описания пространственных конструкций в сеточных методах / Ю. В. Аникина // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: тез. докл. Всеросс. конф. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – С. 11.

8. Аникина, Ю. В. Параметрическое исследование устойчивости многослойной подкрепленной оболочки из композиционных материалов / Ю. В. Аникина // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. тр. 8-й Всероссийской научной конференции: Т. 2. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2006. – С. 3-7.

9. Аникина, Ю. В. Математическое моделирование статики сетчатой оболочки с учетом концентрации напряжений / Ю. В. Аникина, В. О. Каледин, Е. В. Решетникова, Т. В. Бурнышева // Вестник Томского государственного университета. – Приложение №19. – 2006. – С. 233–237.

10. Аникина, Ю. В. Влияние начальных расслоений на статику и устойчивость подкрепленных слоистых оболочек / Ю. В. Аникина // VII Межрегиональная научно-практическая конференция студентов и аспирантов: Ч.1. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2007. – С. 5-8.

11. Аникина, Ю. В. Моделирование упругой волны на поверхности цилиндрической оболочки при взаимодействии с потоком / Ю. В. Аникина // Материалы XV Междунар. конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – М: Вузовская книга, 2007. – С. 51-52.

12. Аульченко, С. М. Моделирование механизма снижения сопротивления оболочек, обтекаемых вязкой жидкостью / С. М. Аульченко, В. О. Каледин, Ю. В. Аникина, Е. В. Решетникова // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. тр. 8-й Всероссийской научной конференции: Т.1. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2006. – С. 8-14.

13. Аульченко, С. М. Численное моделирование механизма снижения сопротивления оболочек тел вращения, обтекаемых вязкой жидкостью / С. М. Аульченко, В. О. Каледин, Ю. В. Аникина // Материалы XV Междунар. конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – М: Вузовская книга, 2007. – С. 60-61.

14. Аульченко, С.М. Моделирование механизма снижения сопротивления оболочек, обтекаемых вязкой жидкостью / С.М. Аульченко, В.О. Каледин, Ю.В. Аникина// Письма в журнал технической физики. – 2007. – Т.33.– №17. – С. 83-88.

15. Каледин, В. О. Напряженно-деформированное состояние спирально-армированных трехслойных оболочек вращения с легким наполнителем / В. О. Каледин, Ю. В. Аникина, Е. В. Решетникова // Краевые задачи и математическое моделирование: сб.тр. 7-ой Всерос. науч. конф. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2004. - С. 72-74.

16. Каледин, В. О. Неосесимметричные свободные колебания слоистых оболочек вращения / В. О. Каледин, Ю. В. Аникина, Е. В. Решетникова // Материалы 15-ой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. –С. 184-193.

17. Каледин, В. О. Численное моделирование статики и устойчивости подкрепленных оболочек с расслоениями / В. О. Каледин, Ю. В. Аникина // Вестник Томского государственного университета. – Приложение №19. – 2006. – С. 225–232.

18. Каледин, В. О. Исследование поведения слоистых подкрепленных оболочек при гидростатических и гидродинамических воздействиях / В. О. Каледин, Ю. В. Аникина // Научный вестник НГТУ. – 2007.–№2.–С. 69-78.

19. Лубяной, Д. А. Методика расчета фурмы для продувки металла азотом методом резонансно-пульсирующего рафинирования / Д. А. Лубяной, Е. В. Решетникова, Ю. В. Аникина // Современные проблемы электрометаллургии стали: сб. тр. 12-ой Междунар. науч. конф. – Челябинск, 2004. – С. 249-252.

20. Лубяной, Д. А. Технология резонансно-пульсирующего рафинирования и методика расчета фурм / Д. А. Лубяной, В.О. Каледин, Е.В. Решетникова, Ю.В. Аникина // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. тр. 7-й Всерос. науч. конф. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2004. – С. 75-77.

21. Aul'chenko, S. M. Modeling a mechanism of decreasing the drag of a shell of revolution streamlined by a viscous fluid / S. M. Aul'chenko, V. O. Kaledin, Ju. V. Anikina // Technical Physics Letters. –2007.–Vol.33.–№9.–P. 755-757.



Шпакова  
Юлия Владимировна

СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И КОЛЕБАНИЯ ПОДКРЕПЛЕННЫХ  
ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Изд. лиц. № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ Подписано в печать  
Формат 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 1.0 Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

---

Новокузнецкий филиал-институт государственного образовательного  
учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский  
государственный университет»  
654041, Новокузнецк, ул. Кутузова, 56  
РИО НФИ ГОУ ВПО «КемГУ»