

На правах рукописи

**ЛЕВИНА Евгения Анатольевна**

**ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ КОРОБЧАТЫХ БАЛОК ИЗ  
ОДНОНАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2006

Работа выполнена в Новокузнецком филиале-институте  
Кемеровского государственного университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Каледин Валерий Олегович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Самсонов В.И.

кандидат технических наук, доцент  
Кулагин А.А.

Ведущая организация: Институт теоретической и  
прикладной механики СО РАН

Защита состоится 17 мая 2006 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. Беллинского, 53-а.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ апреля 2006 г.

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

Костюченко Т.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время в связи с появлением относительно дешевых композиционных материалов и эффективных технологий производства конструкций из них расширяется использование в несущих конструкциях объектов различного назначения полимерных композиционных материалов, которые обладают высокой удельной прочностью, химической стойкостью и не подвержены коррозии. Важной составной частью данной общей проблемы является задача разработки новых конструкций из коробчатых балок, изготавливаемых с применением перспективного высокопроизводительного процесса пултрузионного формования. Их преимуществом является отсутствие соединений между полками и стенками.

В то же время балки указанного вида имеют определенные недостатки, связанные с технологической трудностью реализации сложных схем армирования. Поэтому для них характерна низкая жесткость поперечного сдвига, определяемая жесткостью вязкоупругого связующего. Это снижает статическую жесткость, резонансные частоты и делает необходимым учет деформаций ползучести при длительных нагрузках.

Поведение коробчатых балок с сечением многозамкнутого контура при длительных силовых нагрузках изучено недостаточно. Неизвестны закономерности, определяющие влияние изменения конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние и прочность. При проектировании приходится рассматривать коробчатую балку как пространственную конструкцию и использовать численные методы расчета деформаций и напряжений, причём учет неупругих свойств требует проведения многочисленных трудоемких и продолжительных расчетов.

Поэтому актуально расчетно-теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния коробчатых балок из композиционных материалов при кратковременных и длительных нагрузках, имеющее существенное значение для рационального проектирования новых видов силовых конструкций: плоских и пространственных рам, настилов и т.п.

**Целью работы** является установление закономерностей напряженно-деформированного состояния тонкостенных коробчатых балок из композиционных материалов в зависимости от конструктивных параметров и физико-механических свойств материалов для обеспечения их прочности и жесткости при кратковременных и длительных силовых воздействиях.

**Идея работы** заключается в представлении коробчатой конструкции многозамкнутого контура сечения в виде набора совместно деформируемых ортотропных пластин, в которых неупругие составляющие деформаций описываются одним операторным параметром, и использовании принципа Вольтерра совместно с численно-аналитическим методом решения задачи статики со свободным параметром для получения зависимостей от времени.

### **Задачи исследования:**

- построить математическую модель деформирования коробчатой ортотропной конструкции с многозамкнутым контуром сечения при кратковременных и длительных силовых воздействиях;
- разработать алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния коробчатой конструкции из однонаправленно армированного композиционного материала с учетом вязкоупругих свойств связующего;
- провести параметрическое исследование прочности и жесткости однонаправленно армированных коробчатых балок в зависимости от топологии сечения, размеров и физико-механических свойств материалов;
- сформулировать рекомендации для рационального проектирования коробчатых балок на примере конструкций мостовых настилов;
- оценить точность и достоверность математического моделирования путем сопоставления результатов расчетно-теоретического исследования с данными статических испытаний опытных образцов.

### **Методы исследования** основаны на использовании:

- известных положений теории ортотропных пластин для построения математической модели деформирования конструктивных элементов;
- теории наследственной вязкоупругости для расчета поведения конструкций при длительном нагружении;
- численно-аналитических методов решения краевых задач для расчета напряженно-деформированного состояния и колебаний;
- линейной алгебры для решения систем уравнений высокого порядка.

### **Научные положения, защищаемые автором.**

- Модель деформирования при кратковременных нагрузках коробчатой балки в виде совокупности совместно деформируемых упругих и вязкоупругих пластин, подчиняющихся вплоть до разрушения уравнениям теории упругих ортотропных пластин.
- Модель статического и квазистатического деформирования коробчатой балки из однонаправленно армированного материала при длительных нагрузках, содержащая один операторный параметр и учитывающая перераспределение напряжений между конструктивными элементами в процессе ползучести.
- Разработанный численно-аналитический алгоритм решения задачи наследственной вязкоупругости, позволяющий получить зависимость перемещений и напряжений от времени в аналитическом виде, пригодном для определения параметров ядра релаксации по данным эксперимента.
- Результаты параметрического исследования напряженно-деформированного состояния, форм и частот свободных колебаний при изменении конструктивных параметров коробчатых балок различной топологии и физико-механических характеристик материалов.

**Обоснованность и достоверность научных положений и результатов** обеспечена корректным применением апробированных методов теории упругости, строительной механики и наследственной вязкоупругости; исследованием точности численного решения; согласованием результатов расчетно-теоретического исследования с данными статических испытаний опытных образцов.

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

- разработана математическая модель деформирования коробчатых конструкций из однонаправлено армированных композиционных материалов при длительной статической нагрузке, в которой определяющее соотношение ортотропного вязкоупругого материала содержит один операторный параметр;
- разработан алгоритм расчета вязкоупругого деформирования коробчатой конструкции из однонаправленно армированного материала при длительном нагружении, отличающийся тем, что зависимость перемещений от времени получается в виде аналитически заданной зависимости с коэффициентами, определяемыми численно;
- установлены количественные зависимости перемещений, напряжений и собственных частот от изменения конструктивных параметров и физико-механических характеристик материала коробчатых конструкций с различной топологией сечений;
- определена область рациональных конструктивных параметров сечений двуполостной и трехполостной балки из однонаправленно армированного материала на основе эпоксидного и полиэфирного связующего.

**Практическая значимость работы** заключается:

- в разработке инструментальных программных средств для параметрических исследований напряженно-деформированного состояния коробчатых конструкций многозамкнутого контура из однонаправленно армированных композиционных материалов;
- в выработке рекомендаций по выбору рациональных значений конструктивных параметров, использованных в промышленности при проектировании коробчатых балок.

Работа выполнялась в соответствии с планом НИР Новокузнецкого филиала-института Кемеровского государственного университета.

**Реализация работы.** Результаты работы внедрены в Центральном научно-исследовательском институте специального машиностроения в 2004 г., в ООО «Армопроект» и в ООО «Контраст» (г. Новокузнецк) в 2006 г., что подтверждено актами и справками о внедрении. Часть результатов работы используется в учебном процессе при чтении курсов «Вычислительный эксперимент», «Численные методы решения краевых задач», выполнении курсовых и дипломных работ по специальности 010200 «Прикладная математика и информатика».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы об-

суждались на 6-й и 7-й Всероссийских научных конференциях «Краевые задачи и математическое моделирование» (Новокузнецк, 2003 и 2004 г.), на 18-й Межреспубликанской конференции по численным методам решения задач теории упругости и пластичности (Кемерово, 2003 г.), Региональной научно-практической конференции «Наука и образование» (Белово, 2003 г.), 3-й региональной научно-практической конференции «Информационные недра Кузбасса» (Кемерово, 2004 г.), IV и V Региональных научно-практических конференциях студентов и аспирантов (Новокузнецк, 2004 и 2005 г.), 4-й Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии в экономике, науке и образовании» (Бийск, 2004 г.), на 15-й научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения (Новокузнецк, 2004 г.), на 4-й Всероссийской научно-практической конференции «Информационные недра Кузбасса» (Кемерово, 2005 г.), на XIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Москва-Алушта, 2005 г.), на научном семинаре «Численно-аналитические методы решения краевых задач» в НФИ КемГУ (2004 и 2006 г.).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 11 печатных работ, включая 7 научных статей, 1 отчет о НИР и 3 тезисов докладов на конференциях регионального и международного уровня.

**Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 128 наименований и приложения. Общий объем диссертации без приложения составляет 135 страниц, в том числе 47 рисунков и 7 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность задачи математического моделирования напряженно-деформированного состояния коробчатых конструкций из однонаправленно армированных композиционных материалов, изготавливаемых пултрузией. Сформулированы цель и задачи исследования и защищаемые положения.

**В главе 1** приведен аналитический обзор известных результатов по проблеме обеспечения прочности и жесткости тонкостенных конструкций из композиционных материалов при кратковременных и длительных нагрузках.

Обеспечение прочности и жесткости тонкостенных машиностроительных конструкций из композиционных материалов было предметом многочисленных исследований; наиболее значительный вклад в этой области внесли отечественные ученые И.Ф. Образцов, Ю.Н. Работнов, В.В. Васильев, Г.А. Ванин, В.А. Бунаков, Ю.Н. Немировский, А.Я. Григоренко, Э.И. Григолюк и др., а также Ф. Цай, Н. Пагано и многие другие. В известных работах были построены теоретические основы статики и динамики конструкций из армированных пластиков при кратковременном и длительном нагружении, установлены критерии прочности и устойчивости.

Однако механическое поведение пространственных конструкций из однонаправленно армированных композиционных материалов при длительном нагружении исследовано недостаточно для их рационального проектирования. Использование хорошо разработанных методов расчета слоистых конструкций осложняется большей склонностью к накоплению необратимой деформации при длительной эксплуатации. Известные данные о влиянии ползучести связующего на напряженно-деформированное состояние многоэлементных конструкций фрагментарны, а методы расчета вязкоупругого деформирования сложных конструкций недостаточно разработаны для параметрического анализа при проектировании и прогноза остаточного ресурса при эксплуатации. Неизвестны количественные закономерности влияния конструктивных параметров коробчатых балок, изготавливаемых пултрузионным формованием, на напряженно-деформированное состояние и резонансные частоты.

Поэтому для рационального проектирования несущих конструкций объектов различного назначения, содержащих коробчатые балки из однонаправленно армированных композитов, актуальна разработка математических моделей деформирования при кратковременных и длительных нагрузках и установление количественных закономерностей напряженно-деформированного состояния при варьировании топологических схем, конструктивных параметров и свойств материалов.

**В главе 2** строится математическая модель деформирования коробчатой конструкции из однонаправленно армированного композита применительно к тонкостенной балке, изготавливаемой методом пултрузионного формования. Объект моделирования представляет собой тонкостенную конструкцию неизменного по длине сечения, состоящую из горизонтальных полок и вертикальных и наклонных стенок (рисунок 1). Благодаря особенностям технологии вся конструкция формируется целиком, и её конструктивные элементы не имеют каких-либо соединений.

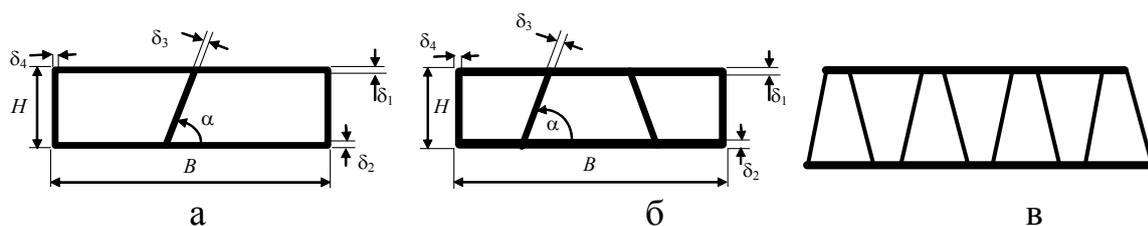


Рисунок 1 - Типовые сечения коробчатых балок

В качестве основы для построения модели взяты гипотезы теории тонких ортотропных пластин. Предполагается, что каждый конструктивный элемент коробчатой балки – полка либо стенка – в отдельности ведет себя как ортотропная пластина, а вся их совокупность деформируется совместно, с сохранением неразрывности перемещений на границах конструктивных элементов. Такой подход дал возможность рассмотреть достаточно широкий класс топологий сечений.

При достаточно малых перемещениях и деформациях работа внешних

сил  $A$  является линейным функционалом перемещений, а энергия деформации  $W$  – квадратичным:

$$A(u) = \int_{S_2} p^T u ds, \quad W(u) = \int_V \frac{1}{2} e^T \sigma dV, \quad (1)$$

где  $S_2$  – часть границы, на которой заданы внешние нагрузки  $p$ ;  $e$  - вектор-столбец компонент деформации;  $\sigma$  - вектор-столбец компонент напряжения;  $u$  – искомый вектор перемещений;  $V$  – объем упругого тела. Используя кинематические гипотезы теории пластин, в пределах каждого конструктивного элемента энергия деформации выражается поверхностным интегралом по площади координатной поверхности  $S$ :

$$W = \frac{1}{2} \int_S \varepsilon^T D \varepsilon dS, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  - вектор-столбец компонент деформаций срединной поверхности;  $D$  – интегральная по толщине матрица упругости пластины. Искомое поле перемещений  $u$  и вектор компонент деформаций  $\varepsilon$  связаны дифференциальными соотношениями Коши.

В качестве воздействий рассматривается распределенная нагрузка, приложенная к верхней полке: либо равномерно по всей поверхности, либо по «пятну». Нагрузка содержит как нормальную компоненту, так и две касательные. Кинематические граничные условия обеспечивают равенство нулю нормальных перемещений на нижней полке в зонах опор. На торцах коробчатой балки могут задаваться условия симметрии либо условия для свободного края.

Используя вариационный принцип Лагранжа, из всех кинематически возможных полей перемещений, удовлетворяющих кинематическим граничным условиям, следует найти то, которое доставляет минимум потенциальной энергии. Это осуществляется приближенно, по дискретной модели, с использованием метода конечных элементов. На основе обычной методики дискретизации получаем систему разрешающих уравнений относительно узловых перемещений:

$$K\delta = R, \quad (3)$$

где  $K$  – матрица жесткости конструкции,  $R$  – вектор-столбец эквивалентных узловых сил,  $\delta$  - вектор-столбец узловых перемещений. Были рассмотрены дискретизации с треугольными конечными элементами Зенкевича и с прямоугольными элементами при кубической интерполяции прогибов. Оба подхода к дискретизации позволяют удовлетворить условиям совместности на границах полков и стенок лишь приближенно. Поэтому точность численного решения приходится оценивать каждый раз оценкой погрешности по правилу Рунге, последовательно удваивая сетку.

При моделировании длительного нагружения для учета накопления деформаций ползучести на основе дискретной модели деформирования коробчатой балки использована теория наследственной вязкоупругости. Поскольку материал армирован в одном направлении, деформации ползучести накапли-

ваются в связующем, а армирующие волокна (стеклянная нить) можно считать упругими. Исходя из этого, предложено описывать процесс ползучести моделью с одним операторным параметром – модулем сдвига. Заменяем операторный параметр переменной величиной; вместо уравнения (3) имеем:

$$(K_0 - \lambda K_1)\delta = R, \quad (4)$$

где  $K_0$  и  $K_1$  – числовые матрицы высокого порядка,  $\lambda$  – разность переменного модуля сдвига и его мгновенного значения. Решение этой системы уравнений с переменным параметром отыскивается в виде:

$$\delta(\lambda) = \sum_{i=0}^{\infty} \Omega_i u_i \lambda^i, \quad (5)$$

где  $\Omega_i$  – нормирующий числовой коэффициент,  $u_i$  – числовой вектор-столбец. Заменяя в полученном решении переменную  $\lambda$  операторным параметром, получаем зависимость перемещений от времени при длительном нагружении:

$$\delta(t) = \delta_0 + \delta_1 \int_0^t \Gamma(t-\tau) q(\tau) d\tau + \delta_2 \int_0^t \Gamma(t-\tau) \int_0^{\xi} \Gamma(\tau-\xi) q(\xi) d\xi d\tau + \dots, \quad (6)$$

где  $\Gamma(t)$  – ядро релаксации.

Такой подход позволяет получить аналитическую зависимость перемещений от параметров ядра релаксации, что дает возможность, не проводя длительных и трудоемких численных расчетов, определить параметры закона вязкоупругости по данным мониторинга прогиба для оценки остаточного ресурса при эксплуатации.

Построенная конечно-элементная модель используется и для анализа свободных колебаний конструкции, для чего обычным образом строится матрица масс и вычисляются собственные числа (квадраты частот) и векторы (формы колебаний) пары матриц – жесткости и масс.

**В главе 3** исследуются закономерности зависимости напряженно-деформированного состояния от конструктивных параметров коробчатых балок с двуполостной и трехполостной топологией сечения.

Рассматривались коробчатые балки из стеклоэпоксидного и стеклополиэфирного пластика, физико-механические характеристики которых принимались из известных экспериментальных данных с учетом климатического старения. Условия закрепления устанавливались, исходя из схемы опирания балки. Для многопролетной балки рассматривался один пролет, причем на торцы накладывалось условие симметрии (равенство нулю продольных перемещений и углов поворота нормали вокруг касательной к контуру сечения). Отдельно рассматривался крайний пролет с наложением условий симметрии только на одно сечение и балка с консольным опиранием.

Деформированное состояние коробчатой балки можно представить как общий изгиб (рисунок 2) и деформацию сечения (рисунок 3). Во всех случаях численное решение исследовалось на сходимость при сгущении сетки до тех пор, пока оценка по правилу Рунге не давала погрешности по перемещениям

2-3% (рисунок 4) и по напряжениям 5-7%.

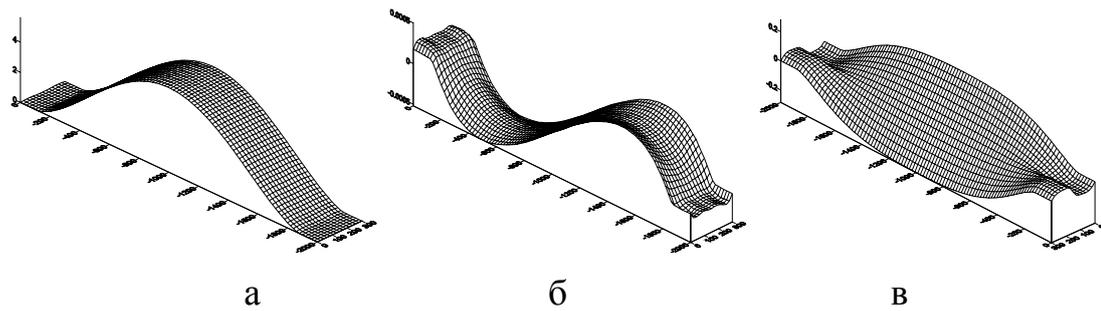
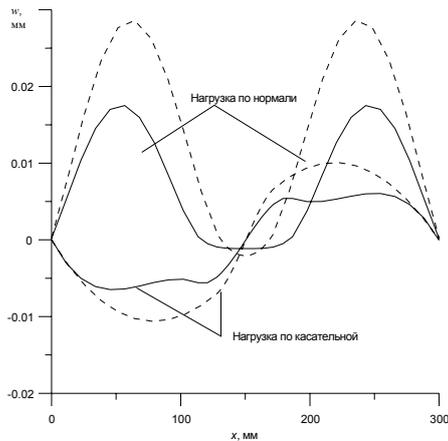
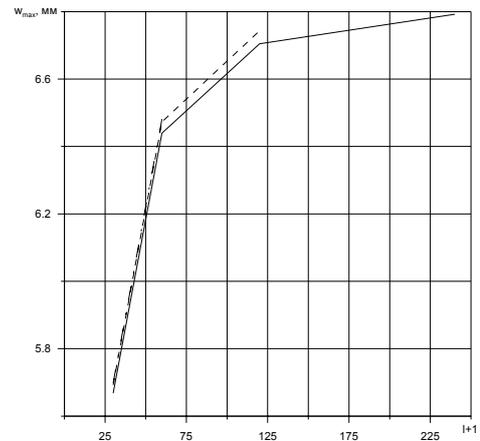


Рисунок 2 - Прогибы верхней полки при равномерном нагружении:  
а – по нормали, б – вдоль балки, в – поперек балки



Сплошная – наклон стенки 15°  
Пунктир – наклон стенки 30°

Рисунок 3 – Изменение прогиба по ширине полки



Сплошная – стеклоэпоксидный пластик  
Пунктир – стеклополиэфирный пластик

Рисунок 4 – Сходимость решения при сгущении сетки

Распределение напряжений в конструктивных элементах также обнаруживает влияние деформации сечения на общий изгиб (рисунок 5).

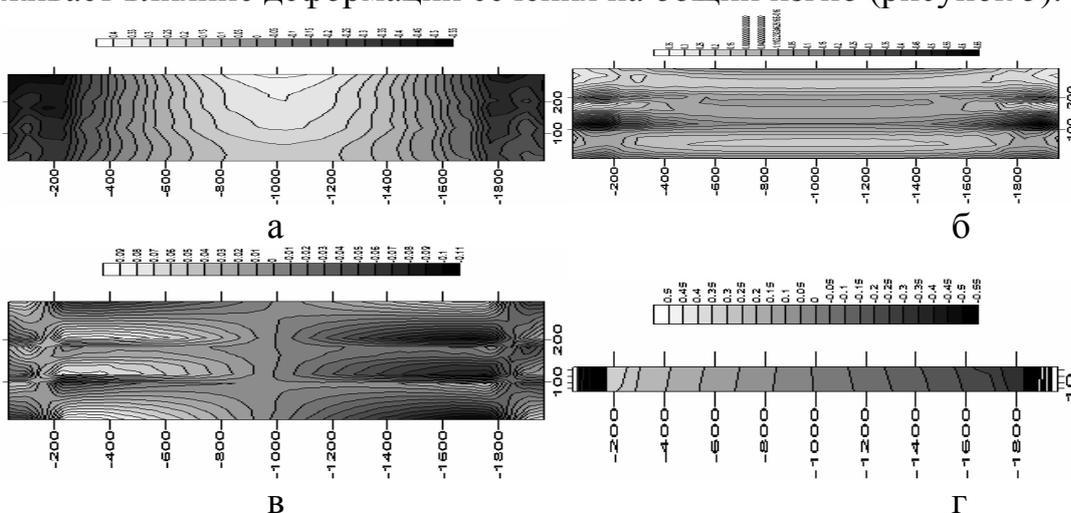


Рисунок 5 – Напряжения при действии всех нагрузок: а – продольные напряжения в верхней полке, б – поперечные нормальные напряжения в полке, в – касательные напряжения в полке, г – касательные напряжения в стенке

Хотя поперечные напряжения и касательные напряжения в полках малы по сравнению с продольными, их предельные значения для однонаправленного материала также малы, поэтому при поверочном расчете необходимо их учитывать. Кроме того, эти напряжения приводят к накоплению деформации ползучести при длительной нагрузке.

Получены зависимости перемещений и напряжений при варьировании всех размеров конструктивных элементов сечения: толщин полок, вертикальных и наклонных стенок и угла наклона наклонных стенок для двуполостных, трехполостных и многополостных коробчатых балок из стеклоэпоксидного и стеклополиэфирного пластика. Кроме того, анализировались зависимости собственных частот от модуля сдвига и зависимости прогибов при длительных нагрузках от параметров экспоненциальных и дробно-экспоненциальных ядер релаксации.

Отмеченные выше недостатки конструкции, вытекающие из низкой сдвиговой жесткости, могут быть частично компенсированы путем армирования сечения по периферии тканью с направлением укладки волокон  $45^\circ$  к оси балки. Проведен анализ зависимости параметров напряженного состояния от относительной толщины слоя, армированного тканью. Найдено, что такое конструктивное решение влияет на частоты свободных колебаний и прогибы при длительной нагрузке. Так, при относительной толщине тканого слоя 2% от толщины стенок прогиб при кратковременной нагрузке уменьшается на 1%, частота собственных изгибных колебаний увеличивается на 1%, крутильных колебаний – на 10-12%, а прогиб при длительном нагружении может уменьшаться на 10-25%, в зависимости от параметров ядра релаксации.

**В главе 4** полученные результаты используются для рационального проектирования коробчатой балки, предназначенной для настила пешеходного моста.

Нагрузки и предельные состояния принимались по СНиП 2.05.03-84. Предельным состоянием первой группы (по жесткости) считалось достижение максимального прогиба, равного  $1/400$  от пролета; предельное состояние второй группы (по прочности) – если хотя бы одна из компонент напряжений достигала соответствующего предела прочности материала, либо если касательные напряжения в каком-либо конструктивном элементе достигали критического напряжения местной потери устойчивости.

Особенностью напряженного состояния являются большие запасы по напряжениям при достижении предельного прогиба (рисунок 6).

Высокая трудоемкость расчета затрудняет параметрическое исследование, поэтому, наряду с конечно-элементной моделью, была построена также упрощенная одномерная модель, в которой сечение считалось не деформируемым, но учитывались деформации поперечного сдвига в соответствии с известной гипотезой Тимошенко. По этой модели максимальный прогиб отличается от полученного методом конечных элементов на 3%, а продольные напряжения в полках – на 4-6% (рисунок 7). При этом точность выше, если в уп-

рощенной модели длина принимается расстоянию между краями опор (штрих-пунктир на рисунке 7), а не между их осями (пунктир).

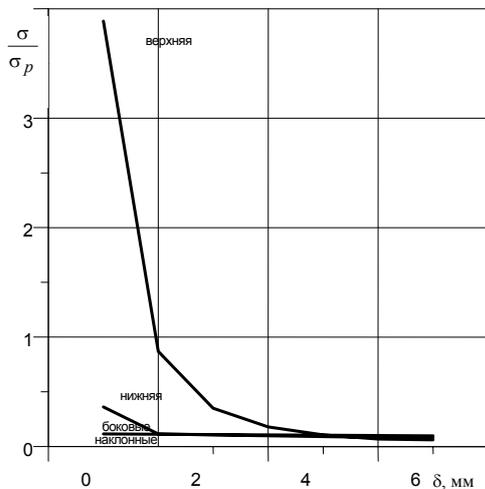


Рисунок 6 – Зависимость относительных (к предельным с учетом устойчивости) напряжений от толщины полок и стенок

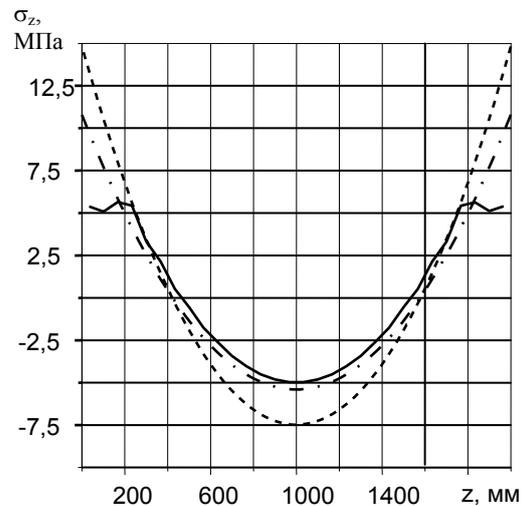


Рисунок 7 – Нормальные напряжения в нижней полке: сплошная линия – МКЭ, пунктир – упрощенная модель

Показано, что лимитирующими являются ограничения по жесткости, в то время как запасы прочности остаются значительными (рисунок 8, а). Лишь при уменьшении толщины до 2 мм и менее возможны предельные состояния 2-й группы. При фиксированных параметрах сечения определены ограничения на допустимый по жесткости пролет (рисунок 8, б).



Рисунок 8 – Области допустимых параметров сечения: толщины полок  $\delta_n$  и стенок  $\delta_c$  (а) и длины пролета (б).

Полученные результаты дали возможность выбрать рациональные параметры сечения, обеспечивающие максимальную жесткость при минимальной

технологически возможной толщине. Для найденного сечения получены предельно допустимые длины пролетов при различных условиях опирания.

Достоверность результатов подтверждена их сопоставлением с данными статических испытаний опытных балок многозамкнутого контура сечения. Опытные образцы были изготовлены из стеклополиэфирных треугольных тонкостенных профилей, полученных методом пултрузии, и прессованных стеклоэпоксидных листов, приклеенных к профилям эпоксидным компаундом. Образцы нагружались до разрушения тремя видами нагрузок: распределенной по длине и соответствующей нормативной нагрузке по СНиП; приложенной в среднем сечении; приложенной по «пятну» в центре панели. Всего было испытано пять панелей.

При испытании перемещение штока и усилие нагружающего устройства записывались самописцем (рисунок 9). Из рисунка видно, что расчетная и экспериментальная диаграммы при первом нагружении практически совпадают. Рассчитанная величина прогиба 17,7 мм при первом нагружении отличается от измеренной 18,4 мм на 4%. При втором и третьем нагружении теоретическая диаграмма отличается от экспериментальной от 1,2 мм до 3 мм, что составляет 8 – 18%. Это объясняется снижением жесткости конструкции вследствие появления начальных повреждений при первом нагружении. Прогибы панели соответствуют расчетной модели и при всех остальных вариантах нагружения. Это подтверждает достаточную точность теоретического определения жесткости по предложенной методике.

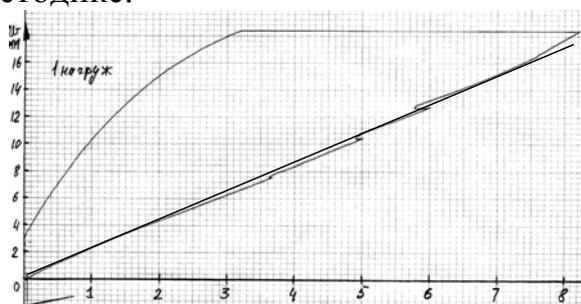


Рисунок 9 – Диаграмма первого нагружения панели силой в среднем сечении: по горизонтали – усилие на штоке, т; по вертикали – перемещение штока, мм. Кривая – машинограмма, прямая – расчет.

Наряду с общим изгибом, наблюдались заметные местные деформации в зоне приложения нагрузки. Начиная от 25% максимальной нагрузки, происходили локальные разрушения, сопровождавшиеся треском. Эти разрушения видны на диаграмме деформирования в виде зубцов. При максимальной нагрузке происходило смятие наклонных стенок треугольных профилей, и после снятия нагрузки наблюдались остаточные прогибы порядка 3 мм. При повторных нагружениях смятие происходило при меньших нагрузках (порядка 20% от максимальной нагрузки в первом нагружении).

Прочность конструкции, измеренная в описанных экспериментах, оказалась существенно выше нормативной (в 13-30 раз для разных образцов), причем меньший запас прочности получен на образце, разрушившемся по клею-

вому соединению. Поскольку спроектированные балки, изготовленные пул-трузионным формованием, не будут иметь клеевых соединений, такой механизм разрушения для них невозможен. Эксперимент подтверждает теоретический вывод о том, что лимитирующими являются ограничения по жесткости.

Таким образом, можно считать результаты моделирования достаточно достоверными для принятия на их основе проектных решений.

## **ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработана математическая модель упругого и вязкоупругого деформирования коробчатых конструкций с многозамкнутым контуром поперечного сечения, в которой коробчатая конструкция рассматривается как совокупность ортотропных пластин.
2. Получено численно-аналитическое решение задачи наследственной вязкоупругости коробчатой балки, учитывающее перераспределение напряжений между конструктивными элементами в процессе ползучести.
3. Разработаны и реализованы в виде вычислительных программ алгоритмы расчета перемещений, деформаций и напряжений в коробчатых балках многозамкнутого сечения из однонаправлено армированных материалов. Тем самым созданы инструментальные средства анализа прочности и жесткости рассматриваемых конструкций при эскизном проектировании.
4. Получены количественные зависимости параметров напряженно-деформированного состояния от размеров полок и стенок и от физико-механических констант материалов.
5. Вычислительным экспериментом установлено, что наличие тонкого слоя тканого материала мало влияет на прогибы при упругом деформировании, но увеличивает собственные частоты и уменьшает прогиб при длительном нагружении.
6. Определены рациональные значения конструктивных параметров коробчатых балок мостовых настилов двуполостного, трехполостного и четырехполостного профиля. Сформулированы рекомендации для рационального проектирования коробчатых балок мостовых настилов. Найдено, что лимитирующими являются ограничения по жесткости, в то время как по прочности остается 10-15-кратный запас.
7. Достоверность теоретических результатов подтверждена сопоставлением с данными статических испытаний опытных образцов. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования различаются не более чем на 6% вплоть до разрушения. Предельные нагрузки отличаются от расчетных на 15-20%.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Разработка методики, алгоритмов и программ для исследования напряженно-деформированного состояния конструкций из композиционных ма-

териалов [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.): ЗН9 / Сибирский гос. индустр. ун-т; рук. Каледин В.О.; исп. Левина Е.А. [и др.]. – Новокузнецк, 1999. – 41 с.

2. Каледин В.О. Параметрическое исследование напряжений и прогибов коробчатой конструкции из композиционных материалов / В.О. Каледин, Е.А. Левина, Е.В. Решетникова // Краевые задач и математическое моделирование: Сб. тр. 6-й Всеросс. науч. конф. – Новокузнецк: изд. центр НФИ КемГУ, 2003. – С. 185-187.

3. Каледин В.О. Исследование прочности и жесткости коробчатой конструкции из композиционных материалов на основе математического моделирования / В.О. Каледин, Е.А. Левина // Информационные недра Кузбасса: Сб. тр. 3-й Региональной науч.-практ. конф. – Кемерово: ИНТ, 2004. – С. 264-265.

4. Левина Е.А. Методика моделирования прочности и жесткости коробчатой конструкции методом конечных элементов / Е.А. Левина // IV Региональная науч.-практ. конф. студентов и аспирантов. Ч.2. Доклады аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2004. – С. 7-8.

5. Левина Е.А. Численное моделирование прочности и жесткости коробчатой конструкции из композитов / Е.А. Левина, В.О. Каледин // Информационные технологии в экономике, науке и образовании: Мат. 4-й Всеросс. науч.-практ. конф. – Бийск: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2004. – С. 101-102.

6. Левина Е.А. Математическое моделирование прочности и жесткости коробчатой конструкции / Е.А. Левина // Мат. 15-й науч.-практ. конф. по проблемам механики и машиностроения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – С. 178-183.

7. Левина Е.А. Параметрическое исследование прочности и жесткости коробчатых конструкций / Е.А. Левина // Краевые задачи и математическое моделирование: Сб.тр. 7-ой Всерос. науч. конф. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2004. - С. 80-81.

8. Каледин В.О. Математическое моделирование жесткости и устойчивости многопролетной коробчатой конструкции / В.О. Каледин, Е.А. Левина // Информационные недра Кузбасса: Тр. 4-й Всерос. науч.-практ. конф. - Кемерово: ИНТ, 2005.- С. 198-199.

9. Левина Е.А. Модель статического деформирования и устойчивости коробчатой конструкции / Е.А. Левина // Мат. 14-й Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – М.: Вузовская книга, 2005. – С. 278-280.

10. Левина Е.А. Статическое деформирование коробчатой конструкции из композитов / Е.А. Левина // V Региональная науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Ч.3. Доклады аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2005. –С. 5-7.

11. Каледин В.О. Жесткость и несущая способность однонаправленно армированной коробчатой балки / В.О. Каледин, А.В. Суханов, В.И. Сисаури, Е.А. Левина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2006. – С. 370-380.

Левина  
Евгения Анатольевна

ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ КОРОБЧАТЫХ БАЛОК ИЗ  
ОДНОНАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать «\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г.  
Формат 60x84 1/16. Бумага писчая. Ризография.  
Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_  
Новокузнецкий филиал-институт Кемеровского государственного  
университета  
654041, Новокузнецк, ул. Кутузова, 56  
РИО НФИ КемГУ