

На правах рукописи



Калашникова Наталья Григорьевна

**ФИЗИЧЕСКОЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЛАСТИНОК СЛОЖНОГО ВИДА ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ
КОНТРОЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

05.11.13 - Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел - 2005

Работа выполнена в Орловском государственном техническом университете

Научный руководитель засл. строитель РФ, доктор технических наук,
профессор **Коробко Виктор Иванович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Иванов Борис Рудольфович
доктор технических наук, доцент
Меркулов Сергей Иванович

Ведущая организация **Московский государственный**
строительный университет

Защита состоится 19 апреля 2005 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при Орловском государственном техническом университете по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Орловского государственного технического университета.

Автореферат разослан 18 марта 2005 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор



А.И. Суздальцев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. При изготовлении строительных и машиностроительных конструкций, строительстве объектов промышленного и гражданского назначения, обследовании зданий и сооружений, подлежащих реконструкции, особое место уделяется вопросам контроля качества конструкций и изделий в процессе изготовления, а также диагностике их состояния в процессе эксплуатации. Для контроля основных параметров качества строительных конструкций, характеризующих их прочность, жесткость и устойчивость, в настоящее время нормативными документами рекомендуется проведение выборочных разрушающих испытаний, которые являются неэффективными и не обеспечивают достоверности результатов контроля. Поэтому разработка новых методов неразрушающего контроля физических характеристик конструкций, интегрально характеризующих их качество, является актуальным научным направлением исследований в теории сооружений, теории машин и механизмов и в области управления качеством строительной продукции. Среди перспективных методов неразрушающего контроля качества особое место занимают экспериментально-теоретические методы, в основу которых положены вибрационные технологии.

Вибрационные методы контроля качества в области строительства в нашей стране практически не используются, нет даже государственных нормативных документов на их применение. Одной из основных причин, объясняющих такое положение, является отсутствие строгого теоретического обоснования и методологического обеспечения этого метода, базирующегося на фундаментальных закономерностях строительной механики.

Профессором В.И. Коробко установлена одна из таких закономерностей в строительной механике, согласно которой существует функциональная связь между жесткостью упругих конструкций и их основной частотой колебаний. Им и его учениками показаны некоторые возможности использования этой закономерности для контроля прочности и жесткости строительных и машиностроительных конструкций. Однако эти возможности далеко не исчерпаны. Поэтому представляется целесообразным проведение более глубоких исследований по выявлению возможностей использования этой закономерности для контроля жесткости строительных конструкций различного вида.

В строительстве и машиностроении наиболее распространенными конструктивными элементами являются балки и плиты (пластинки). При разработке способов

диагностики и контроля качества таких конструкций широко используются методы физико-механического и геометрического моделирования. Для конструкций балочного типа они применяются достаточно широко, чего нельзя сказать о конструкциях в виде пластинок, поскольку вопросы моделирования граничных условий для них являются наиболее трудоемкими и технически сложно реализуемыми.

В настоящее время для решения задач технической теории пластинок, разработан новый эффективный инженерный метод определения интегральных характеристик - метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ), основанный на аналогии интегральных физических характеристик пластинок с интегральной характеристикой их формы - коэффициентом формы K_f . Для практического использования метода при контроле качества конструкций в виде пластинок сложной формы и сложными граничными условиями необходимо построить аппроксимирующие функции, ограничивающие область возможного распределения интегральных характеристик. Однако аппроксимирующие функции построены не для всего множества областей из-за отсутствия соответствующих решений в известной научной и справочной литературе, в частности, не построены граничные кривые для трапециевидных и параллелограммных областей с комбинированными граничными условиями.

Эту проблему можно решить с помощью экспериментальных методов, проведя серию испытаний соответствующих пластинок. При таком подходе используемая комбинация экспериментального и теоретического методов позволит достичь важного практического результата.

В связи с построением аналитических зависимостей, связывающих интегральные параметры конструкций, характеризующих их качество, с динамическими параметрами, появилась возможность приборной реализации вибрационных методов контроля на основе современной электронной и микропроцессорной техники. Для реализации этой задачи необходимо обобщить требования к конструкции такого прибора, разработать его структурную схему - как приложение к заданию для разработчиков такого прибора

Цель исследования заключается в разработке экспериментально-теоретического метода определения интегральных физических характеристик строительных и машиностроительных конструкций в виде пластинок сложного вида и сложными граничными условиями, а также метода моделирования и контроля жесткости таких конструкций, основанных на совместном использовании двух видов формирования моделей.

Поставленная цель предполагает решение **следующих задач:**

1 Разработка экспериментально-теоретического метода определения интегральных физических характеристик пластинок F сложной формы и сложными граничными условиями, основанного на геометрическом моделировании формы области и экспериментальном построении аппроксимирующих функций $F - K_p$, ограничивающих распределение всего множества интегральных физических характеристик пластинок.

2 Построение аппроксимирующих функций, ограничивающих область распределения интегральных физических характеристик для шарнирно опертых пластинок треугольных и четырехугольных форм на примере определения основной частоты колебаний пластинок.

3 Проведение теоретических и экспериментальных исследований аналогии между задачами деформирования пластинок и кручения тонкостенных труб с целью ее использования для оценки точности экспериментальных методов, основанных на изопериметрических свойствах формы пластинок и сечений скручиваемых стержней.

4 Разработка метода моделирования и контроля жесткости пластинок сложного вида и сложными граничными условиями, основанного на использовании двух видов деформирования моделей с использованием вибрационных технологий.

5 Решение тестовых задач по контролю интегральных физических и геометрических характеристик строительных конструкций в виде пластинок треугольной, параллелограммной и трапециевидной форм.

6 Экспериментальная проверка разработанных методов определения интегральных физических характеристик пластинок, а также их моделирования и контроля жесткости.

7 Разработка основных требований к микропроцессорному прибору и его структурной схемы, предназначенного для определения параметров качества строительных и машиностроительных конструкций, основанных на вибрационных технологиях.

Методы исследования. В работе использованы фундаментальные методы теории сооружений и расчета строительных конструкций, методы физикомеханического и геометрического моделирования, метод интерполяции по коэффициенту формы, а также экспериментальные методы и методы математической статистики.

Достоверность научных положений и полученных результатов подтверждается их сравнением с известными результатами, найденными с помощью фундаментальных методов теории сооружений и строительной механики, а также с результа-

тами проведенных экспериментальных исследований.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1 Разработан экспериментально-теоретический метод контроля интегральных физических характеристик строительных и машиностроительных конструкций в виде пластинок сложного вида и сложными граничными условиями, основанный на использовании изопериметрических свойств и закономерностей изменения коэффициента формы пластинок при их геометрическом моделировании.

2 С использованием изопериметрической закономерности изменения коэффициента формы пластинок построены аппроксимирующие функции для кривых, ограничивающих распределение всего множества значений основной частоты колебаний шарнирно опертых пластинок в виде произвольных треугольников и четырехугольников.

3 Разработана методика определения интегральных характеристик пластинок сложной формы и сложными граничными условиями с помощью предложенного экспериментально-теоретического метода.

4 Выявлена аналогия в задачах поперечного изгиба, свободных колебаний пластинок и кручения тонкостенных труб с постоянной толщиной стенки между интегральными физическими характеристиками пластинок и геометрической жесткостью кручения труб.

5 Разработан метод моделирования и контроля жесткости пластинок сложного вида и сложными граничными условиями с использованием двух видов деформирования моделей, граничные условия и форма которых выполняются в упрощенном виде.

Практическая ценность работы заключается в следующем.

1 Экспериментально-теоретический метод и методика определения интегральных физических характеристик строительных и машиностроительных конструкций в виде пластинок сложного вида и сложными граничными условиями, а также метод моделирования и контроля жесткости таких конструкций могут использоваться в проектной практике, при диагностике и контроле качества таких конструкций и при проведении научных исследований в области разработки способов расчета пластинок.

2 Методика по реализации предложенных в диссертации методов может дополнительно лечь в основу разрабатываемых микропроцессорных приборов для диагностики и контроля качества строительных и машиностроительных конструкций, основанных на использовании вибрационных технологий.

Научные положения, выносимые на защиту:

- экспериментально-теоретический метод определения интегральных физических характеристик строительных и машиностроительных конструкций в виде пластинок сложного вида и сложными граничными условиями, основанный на использовании геометрического аналога интегральных характеристик;
- методика реализации предложенного экспериментально-теоретического метода;
- метод моделирования и контроля жесткости пластинок сложного вида и сложными граничными условиями с использованием двух видов деформирования моделей, основанный на функциональной связи жесткости пластинок и основной частоты их колебаний;
- результаты экспериментальных исследований по определению основной частоты колебаний пластинок в виде правильных треугольников и ромбов и геометрической жесткости трубчатых сечений.

Апробация работы. Результаты исследований, приведенные в диссертации, докладывались в 1996...2003 гг. на научно-технических конференциях Орловского государственного аграрного университета и Орловского государственного технического университета, а также на IV-ом Всероссийском семинаре «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (Новосибирск, 2002) и Международных научно-технических конференциях: «Эффективные строительные конструкции: Теория и практика» (Пенза, 2002); «Архитектура и строительство XXI века» (Орел, 2002); «Проблемы и перспективы развития строительства в XXI веке» (Магнитогорск, 2002), вторых международных академических чтений «Новые энергосберегающие архитектурно-конструктивные решения жилых и гражданских зданий» (Орел, 2003).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 научных работ и получен один патент на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 135 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 128 наименований. В работе приведено 33 рисунка и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагается общая характеристика диссертационной работы (обоснование ее актуальности, научной и практической ценности, методологии исследований), формулируются положения, выносимые на защиту, рассматривается структура работы.

В первой главе приводится краткий аналитический обзор работ по проблеме контроля качества строительных и машиностроительных конструкций, рассматривается их место в общей проблеме управления качеством в строительстве, обсуждаются перспективы их развития и совершенствования.

Для контроля качества строительных конструкций и, в частности железобетонных, в настоящее время используются выборочные разрушающие методы испытаний. Эти методы неэкономичны из-за разрушения контролируемых конструкций и неэффективны с точки зрения достоверности результатов выборочного контроля. Перспективным являются неразрушающие вибрационные методы контроля, которые в настоящее время достаточно интенсивно развиваются. Из исследований в этом направлении следует отметить работы: НИИЖБа (Клевцов В.А., Бердичевский Г.И.), МИСИ (Лужин О.В., Почтовик Г.Я.) ЛенЗНИИЭПа (Крылов Н.А., Глуховской К.А.), ТбилЗНИИЭПа (Сехниашвили Э.А.), ОрелГТУ (Коробко В.И.), Северо-Кавказский ЛГУ (Слюсарев Г.В.).

В последние годы профессором Коробко В.И. была установлена закономерность о функциональной связи жесткостигибаемых строительных конструкций с их основной (или первой резонансной) частотой колебаний. Это позволило получить приближенные аналитические зависимости, связывающие и другие параметры качества с динамическими характеристиками конструкций и, тем самым, вплотную подойти к разрешению проблемы поточного контроля качества изготавливаемых конструкций на предприятиях-изготовителях. При этом весьма полезными оказались экспериментально-теоретические методы, сущность которых заключается в получении теоретическим путем аналитических зависимостей между контролируемыми параметрами качества и динамическими характеристиками реальных конструкций и их моделей, и экспериментальном исследовании моделей.

В обзоре отмечается, что для этих целей может эффективно использоваться новый инженерный метод в строительной механике - метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ), который не нашел пока широкого

эффиценту формы (МИКФ), который не нашел пока широкого распространения, поскольку до сих пор не построены границы области распределения всего множества интегральных характеристик F в зависимости от коэффициента формы области K_f , в частности для строительных и машиностроительных конструкций в виде пластинок сложного вида и сложными граничными условиями.

Коэффициент формы определяется по формуле:

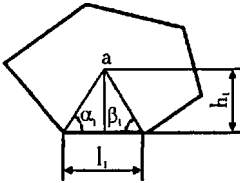


Рисунок 1

$$K_f = \min_l \int ds/h,$$

$$K_{fa} = \min \sum_{i=1}^n l_i/h_i = \sum_{i=1}^n (\operatorname{ctg} \alpha_i + \operatorname{ctg} \beta_i), \quad (1)$$

где h - перпендикуляр, опущенный из полюса, взятого внутри области, на касательную к переменной точке контура, ds - линейный элемент контура области; остальные обозначения приведены на рисунке 1.

Упомянутая выше закономерность, установленная в строительной механике связывает два вида деформаций конструкций (изгиб и колебания) и в ее аналитической записи отсутствуют физико-механические характеристики материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона). Это открывает большие возможности для использования ее при моделировании строительных конструкций.

В обзоре также отмечается, что уровень теоретических и практических разработок по развитию вибрационного метода для контроля качества строительных конструкций оказался таким, что назрела необходимость создания микропроцессорного прибора для реализации поточного контроля качества всех выпускаемых конструкций на предприятиях строительной индустрии.

На основании проведенного аналитического обзора были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе кратко излагаются теоретические основы (геометрические и физические) метода интерполяции по коэффициенту формы и ставятся задачи, которые следует решить для существенного расширения возможностей этого метода для использования при контроле параметров прочности, жесткости и устойчивости пластинок сложного вида и сложными граничными условиями. На основе закономерностей МИКФ разрабатывается экспериментально-теоретический метод контроля интегральных физических характеристик таких пластинок, изла-

гается методика его практической реализации.

Исследуя закономерности изменения коэффициента формы и интегральных физических характеристик при различных геометрических преобразованиях, в частности при аффинных преобразованиях, показана явная аналогия между этими характеристиками, то есть коэффициент формы является геометрическим аналогом интегральных характеристик пластинок. Область распределения всего множества интегральных характеристик F , представленная в координатных осях $F - K_f$, ограничена характерными кривыми: одну из границ (верхнюю или нижнюю) образуют эллипсы, а другую (нижнюю или верхнюю) - многоугольники, описанные вокруг окружности (рисунок 2). Для областей в виде четырехугольных и треугольных фигур верхнюю или нижнюю границу образуют прямоугольники.

На рисунке 2 по оси ординат отложена обобщенная интегральная физическая характеристика.

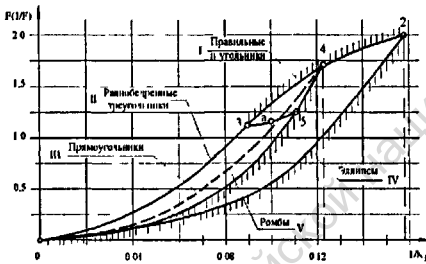


Рисунок 2

Точка 2 соответствует кругу, точки 3 и 4 - равностороннему треугольнику и квадрату, кривая I - правильным фигурам, кривая II - равнобедренным треугольникам, кривая III - прямоугольникам, кривая IV - эллипсам, кривая V - ромбам.

Для прямоугольных и эллиптических областей, а также областей в виде правильных фигур большинство задач теории пластинок решены, и соответствующие границы могут быть построены. Однако решений для пластинок в виде треугольников и ромбов со сложными граничными условиями в научной и справочной литературе практически нет, что не позволяет завершить построение граничных кривых (на рисунке они показаны условно).

Используя закономерность об ограниченности всего множества интегральных характеристик пластинок, представленных в координатных осях $F - K_f$, разрабатывается новый экспериментально-теоретический метод контроля интегральных физических параметров пластинок, характеризующих их прочность,

жесткость и устойчивость, сущность которого заключается в следующем. Для каждой из исследуемых с помощью МИКФ задач (поперечный изгиб, свободные колебания и устойчивость пластинок) при определенном сочетании сложных граничных условий по контуру пластинок путем проведения серии экспериментов на реальных пластинках в виде равностороннего треугольника и ромба или их моделях, выполненных с соблюдением требований геометрического и физико-механического подобия, достраиваются граничные кривые, указанные пунктиром на рисунке 2. Эти кривые описываются аналитически путем аппроксимации полученных экспериментальных данных. Далее, для контроля интегральных физических параметров какой-либо заданной пластинки сложного вида выбирается непрерывное геометрическое преобразование, связывающее ее с двумя другими «опорными» пластинками, решения для которых известны (расположены на граничных кривых $F - K_f$). Затем по опорным решениям, используя методику МИКФ, строится функция

$$F = K(K_f)^n, \quad (2)$$

где параметры K и n определяются по интегральным физическим характеристикам опорных пластинок. Значение контролируемого параметра F для заданной пластинки получается по формуле (2) путем подстановки в нее значения соответствующего коэффициента формы.

Для практической реализации этого способа разработана методика проведения испытаний, которая в работе иллюстрируется на примере контроля основной частоты колебаний параллелограммных и трапециевидных пластинок с шарнирным опиранием по краям.

В этой же главе исследована также задача о кручении тонкостенных труб с постоянной толщиной стенки δ . Известное точное решение этой задачи представлено в изопериметрическом виде:

$$i_k = \frac{L_0}{\delta} \cdot \frac{4A_0^2}{L_0^4}. \quad (3)$$

где L_0 и A_0 - соответственно периметр фигуры, ограниченный средней линией стенки трубы, и площадь, охватываемая ею. Область распределения всего множества решений рассматриваемой задачи, представленная в координатных осях $i_k \cdot \delta / L_0 - 4(A_0)^2 / (L_0)^4$ и $i_k \cdot \delta / L_0 - 1 / K_f^2$, изображена на рисунке 3.

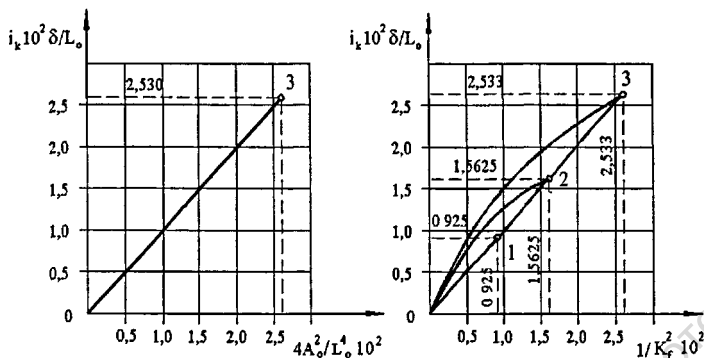


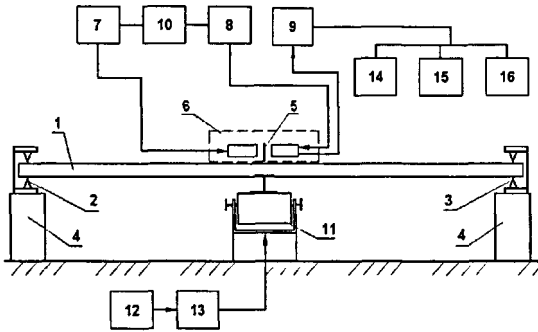
Рисунок 3

На рисунке 3, б нижняя граница соответствует сечениям в виде многоугольников, все стороны которых касаются вписанной окружности, верхняя граница - эллиптическим сечениям; верхней границей для четырехугольных труб произвольного очертания является средняя кривая, соответствующая прямоугольным сечениям.

Графическое изображение границ изменения приведенной геометрической жесткости кручения тонкостенных труб (рисунок 3, б) имеет большое теоретическое значение, поскольку позволяет единообразно представить закономерности изменения интегральных характеристик в задачах теории пластинок и кручения призматических стержней.

Практический же интерес представляет собой элементарная зависимость (3). Поскольку она является точным решением рассматриваемой задачи, то была использована в экспериментах в качестве тестовой задачи, позволяющей оценить достоверность экспериментальных результатов, а также точность решений, получаемых с помощью МИКФ.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований, выполненных для построения граничных аппроксимирующих функций $\omega - K_f$ для пластинок в виде равностороннего треугольника и ромба с шарнирным опиранием по контуру (ω - основная (круговая) частота колебаний пластинок). Для проведения динамических испытаний моделей пластинок использовался набор оборудования, приборов и средств измерений, представленный на рисунке 4.



1 - испытуемая модель, 2, 3 - шарнирно неподвижные опоры, 4 - массивные основания для закрепления опорных частей установки, 5- модулирующий элемент, 6 - первичный преобразователь виброперемещений в электрический сигнал, 7 - устройство тока накачки излучателя, 8 - источник обратного напряжения фотоприемника, 9 - согласующий усилитель, 10 - устройство синхронизации импульсного тока накачки и обратного напряжения фотоприемника, 11 - электродинамический возбудитель колебаний, 12 - генератор синусоидальных сигналов, 13 - усилитель мощности, 14 - частотомер, 15 - цифровой вольтамперметр, 16 - электронный осциллограф

Рисунок 4 - Функциональная схема испытания моделей-пластинок

Были изготовлены две партии моделей-пластинок одинаковой площади $A = 0,1 \text{ м}^2$ из листового дюралюминия толщиной $H = 2 \text{ мм}$, в том числе: шесть пластинок в виде равнобедренных треугольников (модель № 1 ($\beta = 90^\circ$, $a \times h = 63,26 \times 31,63 \text{ см}$), № 2 ($\beta = 120^\circ$, $a \times h = 83,24 \times 24,03 \text{ см}$), № 3 ($\beta = 150^\circ$, $a \times h = 122,16 \times 16,38 \text{ см}$), № 4 ($\beta = 45^\circ$, $a \times h = 40,70 \times 49,14 \text{ см}$), № 5 ($\beta = 30^\circ$, $a \times h = 32,74 \times 61,09 \text{ см}$), № 6 ($\beta = 20^\circ$, $a \times h = 26,56 \times 75,31 \text{ см}$)); три ромбовидных пластинки (модель № 1 ($\alpha = 60^\circ$, $a = 34,00 \text{ см}$), № 2 ($\alpha = 45^\circ$, $a = 37,61 \text{ см}$), № 3 ($\alpha = 30^\circ$, $a = 44,72 \text{ см}$)).

Испытания проводились путем многократного замера резонансной частоты колебаний при различных скоростях вывода моделей на резонанс, при изменении положения вибровозбудителя в окрестности средней части моделей, а также с использованием обычного механического удара для возбуждения колебаний на собственной частоте. Результаты экспериментов были подвергнуты статистической обработке. При этом было установлено, что повышение точности измере-

ний за счет снижения систематических ошибок можно достигнуть только путем совершенствования измерительной аппаратуры.

По полученным экспериментальным данным были построены граничные аппроксимирующие функции в зависимости от аргументов α и K_f .

Для треугольных пластинок:

$$\omega = a + b\alpha + c\alpha^2 + d/\alpha + e/\alpha^2 \quad \omega_2 = 26,35 \sqrt{D/m}/A, \quad (4)$$

где $a = 80,994$, $b = -84,193$, $c = 37,327$, $d = -14,803$, $e = 3,471$, а значения правого угла при основании треугольник α подставляются в радианах;

$$\omega = 1/(-0,01776 + 0,1987/K_f^{0,5}) \cdot \sqrt{D/m}/A; \quad (5)$$

$$\omega = 1/(0,04137 - 4,584 \cdot 10^{-6} K_f^{2,5} + 133,644^{-K_f}) \cdot \sqrt{D/m}/A. \quad (6)$$

Выражение (5) относится к пластинкам в виде равнобедренных тупоугольных треугольников, а (6) - к пластинкам в виде равнобедренных остроугольных треугольников. При выборе вида аппроксимирующих функций к ним предъявлялось требование непрерывности, монотонности, отсутствия точек перегиба и наличия экстремума при $\alpha = \pi/3$.

Для параллелограммных пластинок:

$$\pi^2/4 \cdot K_f/A \cdot \sqrt{D/m} \geq \omega \geq (12,481 + 2,226K_f - 3,730K_f^{0,5}) \sqrt{D/m}/A. \quad (7)$$

При выборе этой аппроксимирующей функций к ней предъявлялось требование непрерывности, монотонности и отсутствия точек перегиба.

С помощью этих граничных функций можно для любого геометрического преобразования треугольников и четырехугольников находить опорные решения и аналитически описывать все решения для подмножества форм пластинок, соответствующих выбранному преобразованию.

Графическое представление области распределения всего множества решений для четырехугольных пластинок, ограниченной построенными аппроксимирующими кривыми, приведены на рисунке 5. Кривая I соответствует решениям для прямоугольных пластинок, а кривая II - для ромбических.

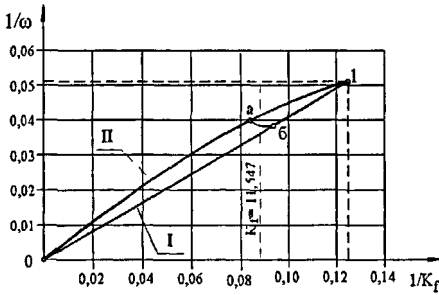


Рисунок 5

использовался набор стандартного оборудования лаборатории сопротивления материалов, предназначенный для этих целей. Для испытаний были изготовлены четыре образца стальных тонкостенных стержней длиной 650 мм с замкнутым контуром и сечением в виде равнобедренных треугольников с углами при вершине $\beta = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ и 45° . Толщина стального листа $\delta = 2$ мм. При выполнении экспериментов и обработке их результатов использовались зависимости, полученные в предыдущей главе.

Сопоставление теоретического решения с полученными экспериментальными данными показало, что точность последних находится в пределах 4...6 %.

Для иллюстрации способов практической реализации МИКФ рассмотрены тестовые примеры с использованием построенных аппроксимирующих кривых для решения задач, связанных с трапециевидной областью. Показано, что ошибки результатов расчета не превышают 5 %.

Принципиальная новизна изложенного экспериментально-теоретического метода подтверждена патентом РФ на изобретение.

В четвертой главе разрабатывается вибрационный метод моделирования и контроля жесткости упругих пластинок сложного вида и сложными граничными условиями с использованием совместно двух видов деформирования пластинок.

В основу метода положена упоминавшаяся уже выше закономерность о функциональной связи жесткости пластинок с основной частотой их колебаний:

- для упругих изотропных пластинок произвольной формы и постоянной жесткости произведение максимального статического прогиба от действия равномерно распределенной нагрузки на квадрат их основной частоты колеба-

В этой же главе были проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению геометрической жесткости кручения для тонкостенных труб с сечением в виде равнобедренных треугольников.

Для проведения испытаний подготовленных образцов треугольных труб на кручение ис-

ний внезагруженном состоянии не зависит от вида граничных условий и ограничено с двух сторон: верхняя граница этого произведения с точностью до размерного множителя равна $(4/\pi)^2$ и соответствует круглым пластинкам, а нижняя граница равна $4/\pi$ и соответствует бесконечно вытянутым пластинкам (балкам):

$$4/\pi \times q/m \leq w_0 \omega^2 \leq (4/\pi)^2 \times q/m, \quad (8)$$

- для пластинок, у которых $K_f = \text{const}$, произведение $w_0 \omega^2$ не зависит от вида граничных условий и с точностью до размерного множителя есть величина постоянная:

$$w_0 \omega^2 = \text{const} \times q/m = K(K_f) \times q/m. \quad (9)$$

Частичное исследование этой закономерности проводилось в ряде работ А.А. Павленко, где рассматривались конструкции с однородными граничными условиями.

Используя эту закономерность, был разработан новый метод моделирования и контроля жесткости строительных и машиностроительных конструкций в виде пластинок сложной формы и сложными граничными условиями. Этот метод имеет две возможности реализации, принципиально отличные от классического метода моделирования конструкций. Обе они следуют из выражения (9), которое не зависит от вида граничных условий пластинок и ограничено зависит от их формы.

Первая возможность заключается в том, что при физическом моделировании таких конструкций отпадает необходимость выполнения на моделях граничных условий, соответствующих натурной конструкции. На моделях можно выполнить легко реализуемые граничные условия (например, условия шарнирного опирания по контуру). При этом максимальный прогиб пластинки со сложными (или неопределенными) граничными условиями, что имеет место в реальных конструкциях, стоящих в сооружении, определяется по формуле:

$$w_0 = (w_0)_m \frac{\omega_m^2}{\omega^2} \frac{m_m}{m} \frac{q}{q_m}, \quad (10)$$

где индекс «м» относится к физическим параметрам модели с упрощенными граничными условиями; характеристики q_m и m_m выбираются из условий геометрического подобия реальной конструкции и модели, а характеристики $(w_0)_m$ и ω_m

определяются экспериментально путем статического нагружения модели и ее динамических испытаний в ненагруженном состоянии.

Вторая возможность заключается в использовании другого свойства закономерности (9): для равновеликих пластинок с одинаковым коэффициентом формы произведение $w_0\omega^2$ есть величина постоянная. Поэтому при моделировании пластинок сложной формы и со сложными граничными условиями можно упрощать не только граничные условия, но и выполнять модель другой формы, например прямоугольной, отличной от формы натурной конструкции. При этом необходимо соблюдать лишь условие равенства коэффициентов формы реальной конструкции и ее модели. При реализации этой возможности жесткость реальной конструкции подсчитывается также по формуле (10).

Как видим, предложенный метод моделирования и контроля жесткости пластинок сложного вида и сложными граничными условиями основан на использовании двух видов деформирования моделей (поперечного изгиба и колебаний), что позволило использовать для контроля жесткости таких конструкций вибрационные технологии.

В работе проведена экспериментальная проверка предложенного метода по реализации его обеих возможностей. При этом точность оценок максимального прогиба пластинок, полученных с его помощью, достигает 5...6 %.

В настоящее время известно около 30 способов контроля параметров качества и различных интегральных физических характеристик строительных конструкций в виде пластинок и балок с использованием вибрационных технологий. Поэтому назрела острая необходимость разработки и создания микропроцессорного прибора для автоматизации процессов контроля и организации сплошного контроля конструкций при их изготовлении на предприятиях строительной индустрии. Такая работа в настоящее время ведется на кафедре «Строительные конструкции и материалы» ОрелГТУ совместно со специалистами Северо-Кавказского ГТУ. В диссертации изложены основные технические требования к такому прибору, разработана его структурная схема, предназначенные для разработчиков прибора.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Обобщая результаты проведенных в диссертации исследований, можно сформулировать следующие выводы.

1 Разработан экспериментально-теоретический метод контроля интегральных физических характеристик строительных и машиностроительных конструкций в виде пластинок сложного вида и сложными граничными условиями, основанный на использовании изопериметрических свойств и закономерностей изменения коэффициента формы пластинок при их геометрических преобразованиях.

2 С использованием изопериметрической закономерности изменения коэффициента формы пластинок построены аппроксимирующие функции для кривых, ограничивающих распределение всего множества значений основной частоты колебаний шарнирно опертых пластинок в виде произвольных треугольников и четырехугольников.

3 Разработана методика определения интегральных характеристик пластинок сложной формы и сложными граничными условиями с помощью предложенного экспериментально-теоретического метода.

4 Выявлена аналогия в задачах поперечного изгиба, свободных колебаний пластинок и кручения тонкостенных труб с постоянной толщиной стенки между интегральными физическими характеристиками пластинок и геометрической жесткостью кручения труб.

5 Разработан метод моделирования и контроля жесткости пластинок сложного вида и сложными граничными условиями с использованием двух видов деформирования моделей, граничные условия и форма которых выполняются в упрощенном виде.

6 Решены тестовые задачи для подтверждения эффективности применения разработанных методов при контроле интегральных физических характеристик пластинок сложной формы и сложными граничными условиями.

7 Проведены экспериментальные исследования для отработки методик по использованию экспериментально-теоретического метода контроля интегральных физических характеристик пластинок, а также метода моделирования и контроля жесткости пластинок с упрощенными формой и граничными условиями.

8 Разработаны технические требования для изготовления микропроцессорного прибора, предназначенного для реализации вибрационных технологий при контроле качества строительных конструкций, и его структурная схема.

Основное содержание работы освещено в следующих публикациях:

- 1 *Калашикова Н.Г.* Уточнение граничных значений произведения максимального прогиба на квадрат основной частоты колебаний для пластинок и балок // Проблемы оптимального проектирования сооружений: Докл. IV-го Всерос. семинара - Новосибирск: НГАСУ, 2002. - С. 175-178.
- 2 *Коробко В.И., Калашикова Н.Г.* Контроль жесткости пластинок по резонансным частотам колебаний реальной конструкции и ее модели // Сборник научных трудов Российской академии архитектуры и строительных наук. Выпуск 1. - М., 2002.- С.20-26.
- 3 *Калашикова Н.Г., Гефель В.В.* Экспериментально-теоретический способ определения интегральных характеристик в задач теории упругости, связанных с треугольной областью // Архитектура и строительство XXI века: сб. науч. трудов - Орел: ОрелГАУ, 2002. - С.83-89
- 4 *Калашикова Н.Г., Малинкин Н.С.* Экспериментально-теоретический способ решения двумерных задач теории упругости, связанных с параллелограммной областью // Строительство, архитектура, образование: Сб. науч. трудов - Магнитогорск: МГТУ, 2002. - С.183-188.
- 5 *Коробко В.И., Калашикова Н.Г.* Определение жесткости изгибаемых элементов конструкций в виде пластинок с помощью вибрационного метода // Эффективные строительные конструкции: Теория и практика: Сб. материалов Международной научно-технической конференции. - Пенза: НГАСА, 2002.
- 6 *Коробко В.И., Калашикова Н.Г., Савельев С.Н.* Вибрационный контроль жесткости конструкций в виде балок и пластинок // Контроль. Диагностика. - 2003. -№ 11. - С. 49-53.
- 7 *Коробко А.В., Калашикова Н.Г., Гефель В.В.* Решение двумерных задач теории упругости, связанных с треугольной областью, с помощью метода интерполяции по коэффициенту формы // Материалы вторых академических чтений «Новые энергосберегающие архитектурно-конструктивные решения жилых и гражданских зданий» - Орел: ОрелГТУ, 2003. - С. 202-209.
- 8 *Калашикова Н.Г.* Способ определения интегральных характеристик в упругих пластинках в виде произвольного четырехугольника // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Тезисы докл. 3-й Международной выставки и конференции. - Москва, 2004. -С. 93.
- 9 *Патент РФ № 2223475*, МПК Кл.⁷ G 01 N 3/00. Способ определения интегральных характеристик для конструкций в виде упругих пластинок и призматических стержней, форма и поперечное сечение которых имеют вид произвольного треугольника и параллелограмма / Коробко В.И., Калашикова Н.Г, Гефель В.В. Опубл. В БИ, № 4, 2004.

05.09-05.11

Из фондов Российской национальной библиотеки

Свидетельство о регистрации №586 серия С от 11 марта 1997 г

Подписано к печати 15 03 2005 г Формат 60x84 1/16 Печать офсетная
Объем 1,0 усл п л Тираж 100 экз Заказ № 13/58

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
Орловского государственного технического университета
302020, г Орел, Наугорское шоссе, 29;

22 МАР 2005

1373