

1560696

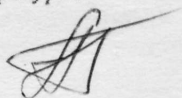
Московский Государственный технический университет
имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи
УДК 531.2:539.4:621.01

ПОДКОПАЕВ Сергей Анатольевич

**Разработка
методов расчета и проектирования гибких упругих
деталей технических устройств**

Специальность: 01.02.06 - динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры.



АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском Государственном
техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Гаврюшин С.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Темис Ю.М.,
ЦИАМ им.Баранова;
кандидат технических наук,
доцент Панов А.Д.,
МГТА

Ведущее предприятие - Научно-исследовательский институт
радиокомпонентов (НИИ РК)

Защита диссертации состоится "09" сентября 1998 г.
в 10⁰⁰ часов на заседании специализированного совета
К 053.15.11 при Московском Государственном техническом
университете им. Н.Э.Баумана по адресу:

107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5..
в 10⁰⁰ часов, аудитория 316

ся в библиотеке Московского
университета им. Н.Э.Баумана.

пре 1998 г.

1560696

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1560696

Подкопаев С.А. Разработ

Попов П.К.

). Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Детали и элементы, выполненные в форме гибких стержней, пластин и оболочек, широко используются в конструкциях современных машин и приборов. Основным рабочим свойством гибких деталей является их способность существенно деформироваться в процессе сборки, настройки и эксплуатации, причем процесс нелинейного деформирования детали определяется комплексом внешних параметров. Получение рациональной с эксплуатационной точки зрения рабочей характеристики гибкого упругого оболочечного элемента коммутационных устройств является актуальной для современного производства задачей. Следует отметить, что известные методики анализа оказываются мало пригодными для рассматриваемого класса изделий. Потребности современного производства требуют дальнейшего развития теоретических и экспериментальных методов расчета и проектирования гибких деталей с заданными рабочими характеристиками. Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью решения важной научно-технической проблемы, связанной с разработкой методики расчета и проектирования гибких упругих деталей и элементов современных технических устройств, которая позволит улучшить качество и потребительские свойства существующих изделий и создавать новые перспективные изделия, опережающие существующий мировой уровень.

Цель и задачи работы. Основной целью диссертационной работы являлось создание методики расчета рабочих характеристик и напряженно-деформированного состояния гибких упругих оболочечных деталей и элементов, используемых в коммутационных изделиях, пультах управления, клавиатурах для ввода алфавитно-цифровой информации и других технических устройствах. В задачи работы входил анализ влияния основных параметров гибких деталей; величин предварительного обжатия на этапе сборки; технологических допусков на этапах изготовления и сборки изделий на рабочие характеристики технических устройств в целом.

Методы исследования. Сложность, а в ряде случаев и практическая невозможность аналитического получения рабочих характеристик гибких упругих элементов обусловили применение для анализа и решения поставленной проблемы методов математического моделирования на базе использования современных высокоэффективных численных методов расчета: метода конечных разностей (МКР) и метода конечных элементов (МКЭ). Проверка теоретических результатов осуществлялась экспериментально с использованием существующих промышленных приборов и установок, а также на базе экспериментальной установки, специально созданной для этой цели.

Научная новизна. Диссертация представляет собой оригинальную законченную исследовательскую работу, содержащую решение важной научно-технической задачи. На защиту выносятся основные, содержащие элемент научной новизны положения диссертации, сформулированные в следующих пунктах:

1. Методика анализа и численные алгоритмы расчета рабочих характеристик и напряженно-деформированного состояния гибких тонкостенных упругих деталей и элементов, предварительно деформированных на этапах сборки и настройки.
2. Результаты численных и экспериментальных исследований, позволившие установить основные количественные и качественные закономерности влияния предварительного деформирования, а также конструктивных и технологических параметров упругих элементов на рабочие характеристики изделия в целом.
3. Результаты решения новых задач, относящихся к исследованию больших прогибов, устойчивости и закритического поведения предварительно деформированных гибких тонкостенных деталей.
4. Результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния и рабочих характеристик гибких упругих элементов, полученные на специально спроектированном для этих целей стендовом оборудовании.
5. Пакет прикладных программ, использующий современные численные методы и предназначенный для расчета и проектирования гибких упругих деталей и элементов технических устройств.

Практическая ценность. На основе проведенных теоретических исследований и полученных экспериментальных результатов разработаны рекомендации и создан пакет прикладных программ, позволяющий проектировать упругие элементы с требуемыми рабочими характеристиками и определять предельно допустимые величины конструктивных параметров, при которых обеспечивается заданный запас прочности и надежности этих деталей. Проведенные исследования ориентированы на непосредственное использование полученных результатов в практике проектирования упругих элементов коммутационных устройств инженерами-конструкторами, не имеющими специальной подготовки в области расчетов на прочность.

Внедрение и реализация в промышленности. Результаты работы в виде программно-методического комплекса, оснащенного средствами графического ввода-вывода информации в удобном для проектировщика виде переданы в НИИ Радиокomпонентов (НИИ РК) для практического использования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены на Всесоюзной научно-технической конференции "Автоматизация исследования, проектирования и

испытаний сложных технических систем" (Калуга 1989); Региональной научно-технической конференции "Моделирование и автоматизация проектирования сложных технических систем" (Калуга 1990); Региональной научно-технической конференции "Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем и проблемы математического моделирования" (Калуга 1991); Международной конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук" (Москва 1991); Международной научно-технической конференции, посвященной 165-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва 1995); 11-ой Международной зимней школе по механике сплошных сред (Пермь 1997), а также на научных семинарах "Теория упругости и строительная механика" кафедры "Динамика и прочность машин" МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1991 - 1998 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 7 работ и 1 работа принята к печати.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, раздела с основными выводами по работе, списка литературы из 189 наименований и приложения. Она изложена на 169 страницах, включая 42 рисунка и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, раскрывается актуальность темы, научная новизна и практическая ценность, поставлены цели и задачи исследований, и изложены основные положения диссертации.

В первой главе диссертации проведен обзор литературы, посвященной расчету и проектированию гибких тонкостенных элементов. Проанализировано современное состояние проблемы применительно к исследованиям геометрически нелинейных задач механики тонкостенных конструкций; прикладным расчетам гибких упругих деталей и элементов технических устройств; анализу гибких тонкостенных деталей и элементов методами численного моделирования. Исторически первые исследования процессов деформирования гибких стержней были проведены Л.Эйлером. Необходимость учета нелинейных факторов при расчете была показана в работах И.Г.Бубнова и Т.Кармана. Теоретическая и инженерная проработка вопросов, связанных с исследованием гибких тонкостенных элементов, отражена в трудах С.П.Тимошенко, А.Н.Крылова, П.Ф.Папковича и получила дальнейшее развитие в работах Л.И.Балабуха, В.Л.Бидермана, Б.Будянского, В.З.Власова, А.С.Вольмира, И.И.Воровича, К.З.Галимова, А.Л.Гольденвейзера, Л.Доннела, Н.А.Кильчевского, В.Койтера,

А.И.Лурье, Х.М.Муштари, В.В.Новожилова, С.Д.Пономарева, Э.Рейснера, В.Флюгге и других ученых. Как этапные следует оценить исследования, проведенные В.И.Феодосьевым. Различные теоретические аспекты и практические приемы расчетов упругих элементов отражены в работах Н.А.Алфутова, Л.Е.Андреевой, Э.Л.Аксельрада, Д.В.Вайнберга, Н.В.Валишвили, М.С.Ганеевой, Э.И.Григолюка, Д.Даниэльсона, Ф.С.Исамбаевой, М.А.Колтунова, М.С.Корнишина, В.А.Крысько, О.С.Нарайкина, П.М.Огибалова, В.В.Петрова, Е.П.Попова, Л.А.Шаповалова, В.А.Светлицкого, И.Сандерса (мл.), И.Саймондса, Р.Миндлина, В.И.Усюкина, В.И.Шалашилина, Л.А.Шаповалова, К.Ф.Черныха и др. В главе обосновывается необходимость разработки новой усовершенствованной методики расчета и проектирования гибких упругих деталей технических устройств, используемых в современном машино- и приборостроении, а также алгоритмов ее численной реализации.

Во второй главе приведены основные соотношения, используемые в качестве исходных для анализа нелинейного поведения гибких упругих элементов коммутационных устройств. В силу многообразия рассматриваемых задач в работе использовались различные соотношения, позволяющие с тех или иных позиций описать сложные геометрически нелинейные процессы деформирования гибких упругих элементов. Выбор основных соотношений и численного метода для их последующего решения определялся рядом факторов, определяющим из которых являлась размерность задачи. В случаях, когда представлялась такая возможность, задача анализировалась на основе более простой одномерной расчетной схемы гибкого стержня. Проблема исследования нелинейного поведения гибкого стержня сводится к решению краевой задачи для системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dX}{ds} = F(s, X, Q) \\ G_0(X, Q) = 0 \\ G_1(X, Q) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь X - вектор основных неизвестных, s - независимая координата, отсчитываемая вдоль оси стержня в недеформированном состоянии; F, G_0, G_1 - векторные операторы, характеризующие правую часть системы дифференциальных уравнений и граничные условия, соответственно; Q - векторный параметр внешних воздействий.

Для большинства упругих элементов свести исходную задачу к одномерной не удалось. При исследовании двумерных нелинейных задач анализ проводился конечно-разностным методом с использованием в качестве разрешающих приведенных ниже соотношений квадратично-нелинейного варианта теории тонких оболочек (Л.А.Шаповалов). Геометрические соотношения:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{A_1} \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_1} u_2 + \frac{w}{R_1}, \\ \omega_1 &= \frac{1}{A_1} \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} u_1, \\ \vartheta_1 &= -\frac{1}{A_1} \frac{\partial w}{\partial \alpha_1} - \frac{u_1}{R_1}, \\ \kappa_1 &= \frac{1}{A_1} \frac{\partial \vartheta_1}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \vartheta_2, \\ \tau_1 &= \frac{1}{A_1} \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \vartheta_1.\end{aligned}\quad \begin{array}{c} \rightarrow \\ (1,2) \\ \leftarrow \end{array} \quad (2)$$

Здесь u_1, w - перемещения точки отсчетной поверхности, ϑ_1, ω_1 - повороты и вращения нормали; A_1 и R_1 - параметры Ламе и главные радиусы кривизны. Линейные деформации, кривизны, скручивание и сдвиг в точке, принадлежащей отсчетной поверхности оболочки, определяются соотношениями:

$$\begin{aligned}E_1 &= \varepsilon_1 + \frac{\vartheta_1^2}{2}, & K_1 &= \kappa_1 - \frac{1}{2R_1} \vartheta_2^2, \\ \Omega &= \omega_1 + \omega_2 + \vartheta_1 \vartheta_2, & \tau &= \frac{1}{2} \left(\tau_1 + \tau_2 + \frac{\omega_1}{R_2} + \frac{\omega_2}{R_1} \right)\end{aligned}\quad \begin{array}{c} \rightarrow \\ (1,2) \\ \leftarrow \end{array} \quad (3)$$

Материал оболочки следует обобщенному закону Гука в форме:

$$\sigma_{11} = \frac{E(\varepsilon_{11} + \mu \varepsilon_{22})}{1 - \mu^2}, \quad \sigma_{22} = \frac{E(\varepsilon_{22} + \mu \varepsilon_{11})}{1 - \mu^2}, \quad \sigma_{12} = \frac{E \varepsilon_{12}}{2(1 - \mu)}.$$

Здесь E и μ - модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала оболочки. Деформации волокна, отстоящего на расстоянии z от срединной поверхности, определяются соотношениями:

$$\varepsilon_{11} = E_1 + zK_1, \quad \varepsilon_{22} = E_2 + zK_2, \quad \varepsilon_{22} = \Omega + 2z\tau \quad (5)$$

Выражения усилий-моментов соответствуют:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{Eh}{1-\mu^2}(E_1 + \mu E_2), & S &= \frac{Eh}{2(1+\mu)}\Omega, \\
 M_1 &= \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}(K_1 + \mu K_2), & H &= \frac{Eh^3}{12(1+\mu)}\tau, & \begin{matrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{matrix} & (1,2) \\
 Q_1 &= \frac{1}{A_1 A_2} \left\{ \left(\frac{\partial A_2 M_1}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{A_1} \frac{\partial A_1^2}{\partial \alpha_2} - \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} M_2 \right) - \right. \\
 &\quad \left. - A_1 A_2 \left[\left(T_1 - \frac{M_2}{R_2} \right) \vartheta_1 + S \vartheta_2 \right] \right\} & (6)
 \end{aligned}$$

Уравнения равновесия записываются в виде:

$$\begin{aligned}
 &\frac{\partial A_2 T}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{A_1} \frac{\partial A_1^2 S}{\partial \alpha_2} - \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_1} T_2 + \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{A_1 H}{R_1} \right) + \frac{1}{R_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} H + \\
 &+ \frac{A_1 A_2}{R_1} Q_1 + A_1 A_2 p_1 = 0, & \begin{matrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{matrix} & (1,2) & (7) \\
 &\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} - \frac{1}{A_1 A_2} \left(\frac{\partial A_2 Q_1}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial A_1 Q_2}{\partial \alpha_2} \right) - p_n = 0.
 \end{aligned}$$

Здесь p_1 и p_n - компоненты внешней распределенной нагрузки. В соответствии с порядком системы дифференциальных уравнений на контуре формулируются по четыре краевых условия, которые накладываются в виде комбинации ограничений на четыре кинематических величины u_1 , u_2 , w , ϑ_1 и четыре статические величины:

$$T_1, \quad M_1, \quad \bar{S}_1 = S + 2 \frac{H}{R_2}, \quad \bar{Q}_1 = Q_1 + \frac{\partial H}{\partial \alpha_2}, \quad \begin{matrix} \rightarrow \\ \leftarrow \end{matrix} \quad (1,2) \quad (8)$$

Для решения ряда задач в качестве разрешающих использовались также уравнения пологих оболочек (В.З.Власов).

Для упругих элементов сложной геометрической формы применялся метод конечного элемента. Использовались изопараметрические вырожденные прямоугольные элементы, построенные с использованием гипотезы Тимошенко-Миндлина. Метод конечных элементов применялся в основном для проверочных расчетов при более детальном анализе напряженно-деформированного состояния элементов.

В третьей главе дано обоснование, и приведены основные расчетные модели, используемые для анализа процессов деформирования гибких упругих элементов. Для элементов, деформируемых в условиях, близких к цилиндрическому изгибу, исследования удалось провести, используя одномерную расчетную модель гибкого стержня. Нелинейная краевая задача сводилась к решению задачи Коши и решению системы нелинейных операторных уравнений относительно начального вектора. Большая часть элементов анализировалась на базе двумерных соотношений. Для исследования использовались разностная схема в перемещениях и смешанная конечно-разностная схема, отличающиеся друг от друга различным набором компонент вектора узловых неизвестных.

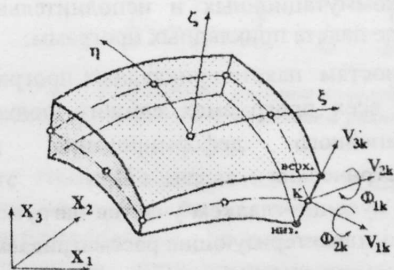


Рис.1 Изопараметрический криволинейный конечный элемент оболочки.

Использование конечно-элементного подхода было продиктовано необходимостью уточненного анализа напряженно-деформированного состояния, и в основном проводилось для гибких элементов и деталей сложной геометрической формы. При конечном элементном анализе использовались двумерные оболочечные элементы (Рис.1) с линейной аппроксимацией пространственного вектора перемещений по нормальной координате (E.Hinton, D.R.J.Owen). Эффективность модели связана с понижением максимального порядка производных в соответствующих функционалах и, как следствие, смягчением требований гладкости, предъявляемых к используемым при построении конечных элементов функциям формы.

В четвертой главе рассматриваются алгоритмы численного исследования процессов деформирования нелинейных конструкций и их программная реализация. В работе использовался многопараметрический подход (С.С.Гаврюшин), позволяющий исследовать многопараметрическую задачу как последовательность кусочно-гладких однопараметрических нелинейных задач. Переход от одной задачи к другой производился с помощью приема "смены подпространства управляющих параметров". Каждая задача погружалась в многопараметрическое семейство аналогичных задач, что позволяло проводить не только проверочные расчеты, но и приступать непосредственно к решению задачи проектирования.

При использовании процедуры дискретного продолжения по параметру в работе использовалась двухэтапная процедура по схеме - "предиктор - корректор". На первом этапе, на основании предыстории процесса при помощи экстраполяции осуществляется предсказание начального значения вектора неизвестных X . Для этого в памяти сохранялась информация о предыдущих решениях. На этапе "корректор" реализуется уточнение начального приближения итерационным способом. Выбор итерационного метода существенным образом зависит от порядка нелинейной системы, ее структуры и особенностей, связанных с использованием той или иной расчетной модели. Предлагаемые в диссертационной работе расчетные модели и алгоритмы численного исследования нелинейных рабочих характеристик и напряженно-деформированного состояния гибких упругих деталей и элементов коммутационных и исполнительных устройств были реализованы в виде пакета прикладных программ.

К отличительным особенностям пакета прикладных программ следует отнести реализацию во всех программах единого подхода к описанию процессов нелинейного деформирования как последовательности однопараметрических задач. При этом предполагается, что на каждом кусочно-гладком участке нагрузка и физико-геометрические параметры, характеризующие рассматриваемое семейство элементов, однозначно зависят только от одного параметра. При численном счете переход от этапа сборки к этапам настройки и нагружения производится с помощью приема смены подпространства внешних параметров, который позволяет изменять заданные на предыдущем кусочно-гладком участке физико-геометрические параметры упругого элемента и законы нагружения.

Пятая глава посвящена тестированию, сравнительной оценке эффективности и экспериментальной проверке достоверности полученных результатов. Тестирование прикладных пакетов программ было проведено путем сравнения результатов численного счета по разработанным программам с известными решениями эталонных и модельных задач анализа линейного и геометрически нелинейного поведения тонкостенных конструкций. Был проведен также ряд поверочных расчетов непосредственно для реальных упругих элементов, результаты численных и экспериментальных исследований которых удалось найти в публикациях других авторов. Так на рисунке 2 приведены полученные в работе результаты расчета пологой сферической оболочки шарнирно - подвижно опертой по контуру под действием равномерного внешнего давления (кривая 1) в сравнении с решениями В.В. Петрова - 2; В.В. Кислюцкого и др. - 3; В.А. Крысько - 4; С.С. Гаврюшина - 5.

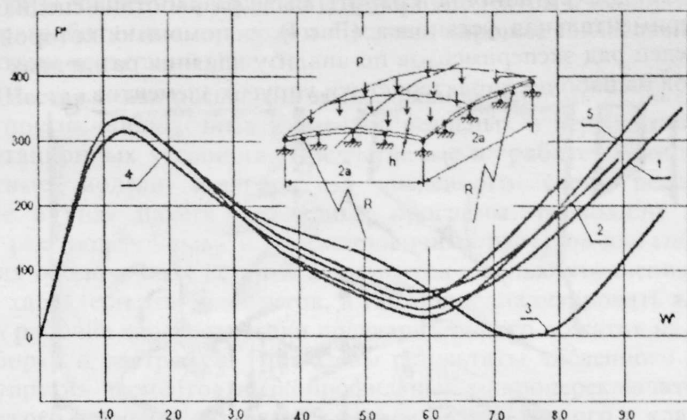


Рис.2. Результаты расчета пологой шарнирно-подвижно опертой гибкой сферической оболочки под действием равномерного внешнего давления.

Проверка адекватности предлагаемых расчетных моделей и достоверности получаемых на их основе численных результатов контролировалась посредством их сопоставления с данными экспериментов, проведенными на специальном стенде в Научно-исследовательском институте радиокомпонентов (Рис.3).

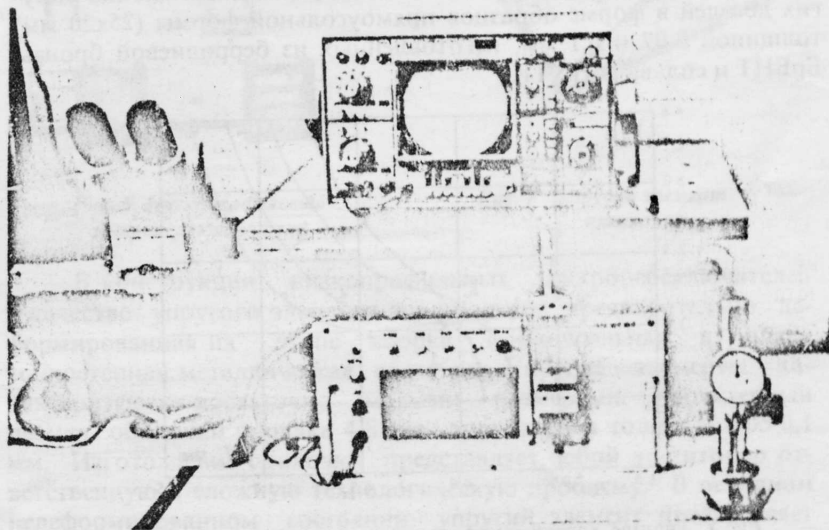


Рис.3 Общий вид испытательного стенда

В рамках диссертационной работы была разработана специальная экспериментальная установка (Рис.4), с помощью которой был проведен ряд экспериментов по анализу влияния различных параметров на рабочие характеристики упругих элементов.

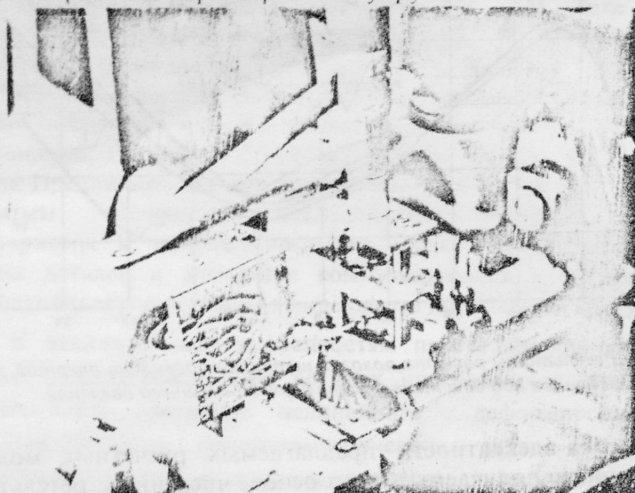


Рис.5 Экспериментальная установка для исследования рабочих характеристик предварительно деформированных плоских образцов.

Исследования проводились на масштабных моделях гибких упругих деталей в форме образцов прямоугольной формы (25x20 мм) толщиной 0.07 и 0.1 мм, изготовленных из бериллиевой бронзы БрБНТ и сплава 36ГХТЮ.

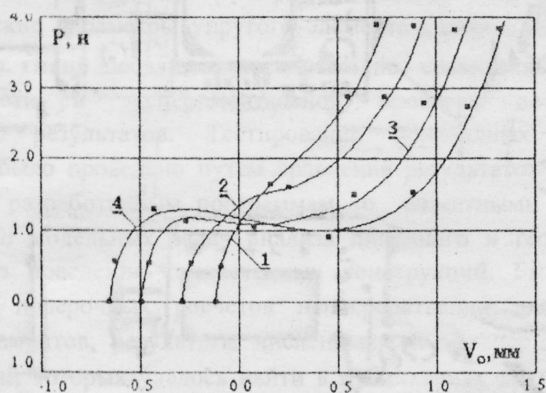


Рис.5. Упругие характеристики шарнирно опертых по противоположным краям образцов при различных значениях предварительного обжатия (--- результаты численного решения; $\square$ - результаты эксперимента).

Результаты численных расчетов упругих элементов с использованием разработанных программ показали хорошее согласование с результатами испытаний (Рис. 5).

Шестая глава посвящена исследованию рабочих характеристик упругих оболочечных элементов реальных и перспективных коммутационных устройств. Предлагаемые в работе методика, расчетные модели и алгоритмы численного счета, реализованные в виде пакета прикладных программ, позволили провести ряд поверочных и проектировочных расчетов для гибких упругих оболочечных деталей и элементов с целью уточнения рабочих характеристик элементов, а также проанализировать влияние на рабочие характеристики предварительного обжатия на этапах сборки и настройки. Приведены результаты численного анализа упругих элементов низкопрофильных микропереключателей и упругого элемента двусвязной формы, используемого в клавиатуре компьютера и в переключателях.

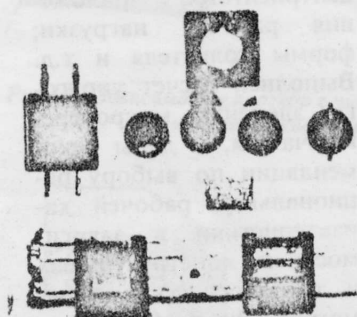


Рис. 6 Низкопрофильный микропереключатель



Рис. 7 Упругий элемент клавиатуры

В конструкции низкопрофильных микропереключателей в качестве упругого элемента используется предварительно деформированная на этапе сборки прямоугольная в плане тонкостенная металлическая оболочка. Упругие элементы характеризуются достаточно малыми размерами. Характерный размер оболочки порядка 4-8 мм, характерная толщина 0,05-0,1 мм. Изготовление оболочки представляет собой достаточно ответственную и сложную технологическую проблему. В исходном недеформированном состоянии упругий элемент представляет собой тонкую прямоугольную пластину, изготовленную из листовой заготовки.

На этапе сборки упругий элемент устанавливается с натягом в корпус, что приводит к существенному изменению его геометрической формы. По окончании этапа сборки упругий элемент следует классифицировать как предварительно деформированную тонкую оболочку прямоугольной в плане формы. Таким образом, при проектировании конструкции микропереключателя в целом возникает комплексная проблема, связанная с качественной и количественной оценкой влияния на рабочую характеристику гибкого элемента целого ряда конструктивных и технологических параметров. В том числе: геометрических размеров

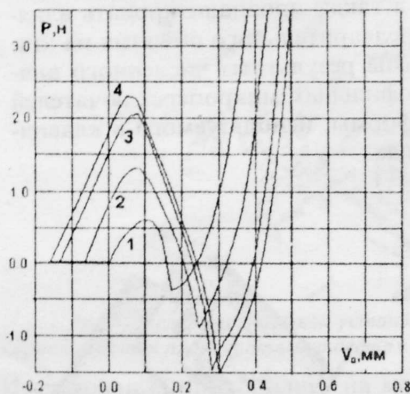


Рис. 8 Зависимость упругой характеристики микропереключателя от величины предварительного обжатия заземленных кромок.

элемента и механических свойств материала; величины предварительного обжатия с учетом технологических допусков на изготовление элемента и гнезда в корпусе; эксцентриситетов приложения рабочей нагрузки; формы толкателя и т.д. Выполнен расчет упругого элемента микропереключателя, и даны рекомендации по выбору рациональной рабочей характеристики в зависимости от конструктивных и технологических параметров. (Рис.8 и 9)

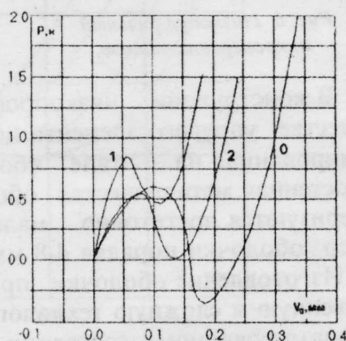
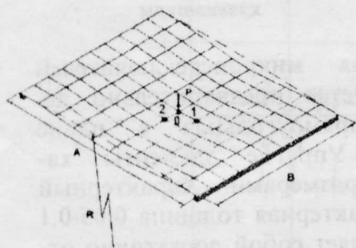


Рис. 9. Влияние эксцентриситета приложения нагрузки на упругие характеристики микропереключателя

Упругий элемент клавиатуры (Рис. 7) представляет собой двумерную прямоугольную в плане упругую тонкостенную оболочку со сложным вырезом. Элемент закреплен посредством штифтов и прорези в пределах небольшого участка и свободно опирается в двух угловых точках.

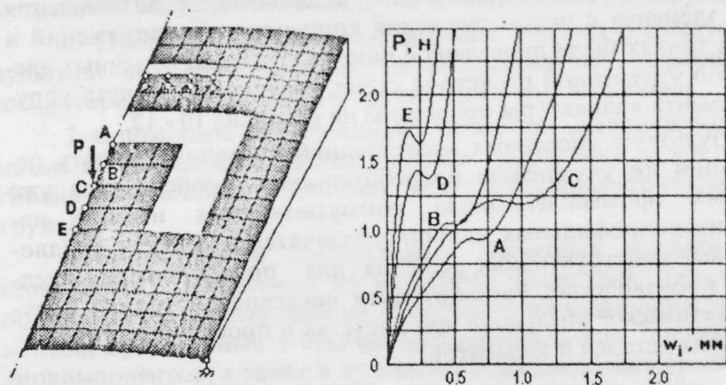


Рис. 10. Зависимости прогиба в точке приложения силы от ее величины при изменении координаты точки приложения.

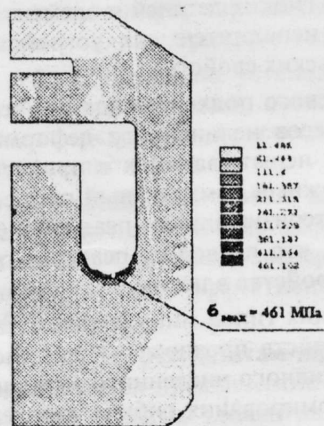


Рис. 11. Линии уровня эквивалентных напряжений (оптимизированный вариант, точка М)

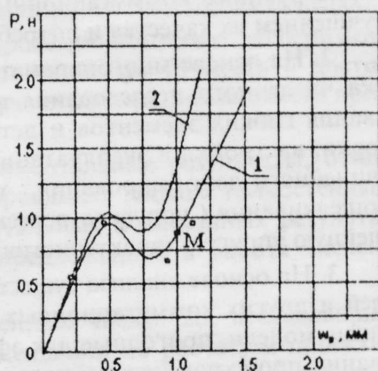


Рис. 12. Рабочая характеристика упругого элемента (исходный -1, и оптимизированный вариант-2)

Практически на всем внешнем контуре элемента граничные условия соответствовали условиям свободного контура. Нагрузка прикладывалась через пружину на "язычок" элемента. Закрепление в прорези моделировалось по схеме шарнирно-неподвижного опирания. Численное моделирование нелинейного поведения упругого элемента было проведено с помощью смешанной конечно-разностной схемы, а дальнейшая оптимизация формы элемента с целью снижения концентрации напряжений в угловых точках была проведена с помощью метода конечных элементов по уточненной расчетной схеме. Результаты расчета упругого элемента клавиатуры приведены на рисунках 10 - 12.

Результаты численных исследований позволили выдать рекомендации по улучшению потребительских свойств ряда уже освоенных промышленностью коммутационных изделий, например низкопрофильных микропереключателей, а также предложить новые конструктивные решения для последующего внедрения в производство. Разработанная численная методика получила практическое внедрение при расчетах и проектировании гибких упругих деталей и элементов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

1. Теоретически обобщена и решена прикладная научно-техническая проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение, связанная с использованием гибких деталей и элементов в конструкциях коммутационных и исполнительных устройств, улучшением их качества и потребительских свойств.
2. На основе многопараметрического подхода создана методика численного исследования процессов нелинейного деформирования гибких элементов и деталей, испытывающих в процессе сборки, настройки и эксплуатации сложный комплексный процесс нелинейного деформирования, характеризующийся реализацией проселкивания (упругого перескока), что позволяет реализовать релейную упругую характеристику устройства в целом.
3. На основе анализа существующих типов микропереключателей и других коммутационных устройств предложены три численные модели, пригодные для эффективного численного моделирования процессов нелинейного деформирования гибких деталей и элементов: модель, основанная на сведении краевой задачи к задаче Коши; двумерная конечно-разностная модель; конечно-элементная модель.
4. На основе предложенных численных моделей разработаны алгоритмы расчета и прикладное программное обеспечение

для расчетов и проектирования упругих элементов микропереключателей и других аналогичных устройств на ПЭВМ типа IBM PC.

5. Проведено тестирование разработанных алгоритмов и прикладного программного обеспечения путем сравнения результатов численного счета по разработанным программам с известными решениями эталонных и модельных задач анализа геометрически нелинейного поведения тонкостенных конструкций.

6. Проведены поверочные расчеты упругих элементов, результаты численных и (или) экспериментальных исследований для которых удалось найти в публикациях других авторов.

7. С помощью разработанной численной методики получены новые и уточненные решения для ряда прикладных задач расчета гибких тонкостенных оболочек при многопараметрическом нагружении.

8. Адекватность предлагаемых расчетных моделей и достоверность получаемых на их основе численных результатов подтверждена посредством их сопоставления с данными экспериментов, проведенных в Научно-исследовательском институте радиокомпонентов, а также в других организациях, непосредственно занимающихся проектированием и изготовлением коммутационных устройств.

8. Спроектирована и изготовлена в металле оригинальная экспериментальная установка, позволяющая исследовать процессы нелинейного деформирования гибких упругих деталей и элементов при многопараметрическом нагружении на масштабных моделях.

9. С помощью установки проведен комплекс экспериментальных исследований, позволивший оценить точность и достоверность результатов расчета, получаемых с помощью пакета прикладных программ.

10. Получены новые экспериментальные результаты, относящиеся к нелинейному деформированию гибких тонкостенных элементов. Сравнение экспериментальных и численных результатов подтвердило эффективность предложенной в работе численной методики.

11. По результатам проведенных численных исследований подготовлены практические рекомендации по расчету и проектированию упругих элементов микропереключателей и других технических устройств.

12. Результаты работы получили внедрение в практику работы научно-исследовательских организаций и предприятий (НИИРадиоКомпонентов, г.Москва и ВНИИХолодМаш, г.Москва).

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Гаврюшин С.С., Подкопаев С.А., Численный метод исследования закритического поведения тонких упругих оболочек // Всесоюзная научно-техническая конференция "Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем": Тез. Докл. - Калуга, 1989. -

С. 190-191.

2. Подкопаев С.А., Гаврюшин С.С. Численное исследование прочности упругого элемента всасывающего клапана // Региональная научно-техническая конференция "Моделирование и автоматизация проектирования сложных технических систем": Тез. Докл. - Калуга, 1990. - С. 8-9.

3. Гаврюшин С.С., Подкопаев С.А. Экспериментальное исследование характеристик упругих элементов коммутационных устройств // Региональная научно-техническая конференция "Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем и проблемы математического моделирования": Тез. Докл. - Калуга, 1991. - С. 91-92.

4. Гаврюшин С.С., Подкопаев С.А. Численное моделирование и рациональное проектирование упругого элемента всасывающего клапана // Тр. МГТУ. - 1991. - № 550. Автоматизация проектирования. - С. 32-40.

5. Гаврюшин С.С., Подкопаев С.А. Исследование упругих характеристик оболочечных элементов коммутационных устройств // Международная конференция "Актуальные проблемы фундаментальных наук": Тез. Докл. - Москва, 1991. - С. 78-79.

6. Подкопаев С.А. Расчет и проектирование предварительно деформированных тонкостенных элементов коммутационных устройств // Международная научно-техническая конференция, посвященная 165-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана: Тез. Докл. - Москва, 1995. - С.117.

7. Подкопаев С.А. Разработка методов расчета и проектирования гибких упругих деталей коммутационных устройств // 11-ая Международная зимняя школа по механике сплошных сред: Тез. Докл. - Пермь, 1997. - С.230.

Автор: 