

THE

АЛИ Абдул Карим

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ
ТЕРМОБИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДИСКРЕТНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКОЙ**

01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

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

2

Москва - 2005

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

Научный руководитель: д.т.н., профессор
Гаврюшин Сергей Сергеевич

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор
Сарбаев Борис Сафиулович

к.т.н., доцент
Осипов Николай Леонидович

Ведущая организация: ФГУП НИИ физических проблем им.
Ф.В. Лукина.

Защита диссертации состоится 22 декабря 2005 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан "18" ноября 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Карпачев А.Ю.

Актуальность темы Детали и элементы, выполненные в форме тонких термобиметаллических (ТБ) пластин и оболочек находят широкое применение в конструкциях современных электротехнических устройств и являются ответственными элементами этих изделий, так как от их работы зависит функционирование всей системы в целом. Наряду с широко известными конструктивными исполнениями в последние годы в современном приборо- и машиностроении появился ряд новых изделий, в которых используются новые оболочечные ТБ элементы нетрадиционной формы (рис.1), а также ТБ элементы, реализующие особые свойства и качества и отвечающие ряду новых и дополнительных требований. На пример создаются оболочечные ТБ элементы сложной геометрической формы, обеспечивающие нужной дискретной рабочей характеристикой.

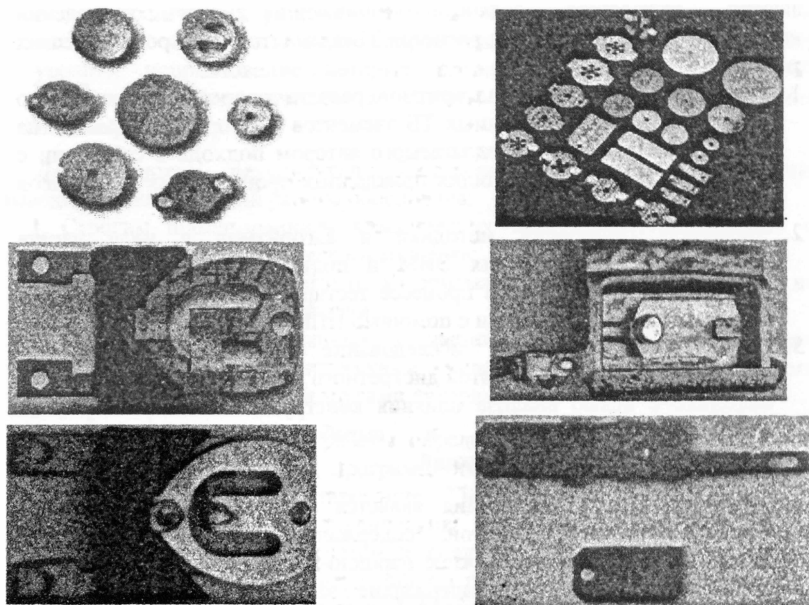
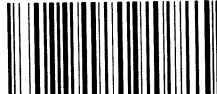


Рис. 1. Виды ТБ элементов, применяемых в технике.

Анализируя проблемы, связанные с разработкой и использованием оболочечных ТБ элементов в современных электротехнических устройствах, можно отметить, что известные аналитические подходы и методики, либо не позволяют в полном объеме и с требуемой точностью учесть все особенности сложного процесса нелинейного деформирования ТБ элементов, либо, вообще, не позволяют решить ряд задач.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1738189

Али Абдул Карим Расчет и п

Создание ТБ элементов с высокими функциональными характеристиками, является в современном машино- и приборостроении задачей первостепенной важности.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью решения важной прикладной научно-технической задачи, посвященной расчету и проектированию оболочечных ТБ элементов дискретного действия, применяемых в конструкциях электротехнических устройств, улучшением их качества и потребительских свойств.

Цель и задачи работы Диссертация посвящена расчету и проектированию оболочечных ТБ элементов дискретного действия, которые в процессе эксплуатации испытывают сложный процесс нелинейного деформирования, характеризующийся, большими перемещениями и хлопками.

Целью диссертации является создание численной методики расчета и проектирования оболочечных ТБ элементов дискретного действия. В работе решаются следующие задачи, возникающие при проведении проектировочных и поверочных расчетов ТБ элементов электротехнических устройств:

1. Разработка методики и алгоритмов расчета процессов нелинейного деформирования оболочечных ТБ элементов приборных устройств на основе использования предлагаемого автором подхода в сочетании с возможностями существующих прикладных программных комплексов (ППК).
2. Численная реализация методики и алгоритмов в виде пакета прикладных программ для ЭВМ и подтверждение достоверности полученных результатов в процессе тестирования и сопоставления с результатами, полученными с помощью ППК «ANSYS».
3. Проведение численного исследования процессов нелинейного деформирования ТБ элементов дискретного действия по разработанной методике с целью анализа влияния конструктивных параметров на рабочую характеристику и выработки рекомендаций по совершенствованию конструкций.

Научная новизна Диссертация является законченной оригинальной научно-исследовательской работой, содержащей решение прикладной технической задачи, имеющей важное народно-хозяйственное значение. На защиту выносятся основные, содержащие элементы научной новизны положения диссертации, сформулированные в ниже перечисленных пунктах.

1. Численная методика расчета и проектирования ТБ оболочечных элементов сложной формы, позволяющая совершенствовать существующие и создавать новые конструкции технических устройств с дискретной рабочей характеристикой и другими требуемыми техническими параметрами.

2. Алгоритм и прикладная программа для ЭВМ, предназначенная для расчета и проектирования ТБ элементов в форме тонкостенных осесимметричных куполов, позволяющая определить область рациональных значений конструктивных параметров и, как следствие, существенно сократить процесс проектирования ТБ элементов сложной формы.
3. Новые результаты для модельных и тестовых задач нелинейного деформирования тонкостенных ТБ элементов, проясняющие влияние основных конструктивных параметров на процесс нелинейного деформирования и рабочую характеристику устройств. Новые результаты, полученные по авторской программе и с помощью ППК «ANSYS» для реальных ТБ элементов, позволяющие найти пути и резервы для совершенствования и создания новых конструкций ТБ элементов электротехнических устройств.
4. Рекомендации по проектированию ТБ элементов существующих электротехнических устройств и новые конструкции оболочечных ТБ элементов, соответствующие современному мировому техническому уровню, использование которых позволит существенно повысить эксплуатационные качества и снизить трудоемкость изготовления изделий.

Достоверность результатов Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы обоснована:

1. Строгим использованием классических механических концепций и адекватного математического аппарата;
2. Проверкой разработанного алгоритма и программы расчета на модельные и тестовые задачи;
3. Соответствием полученных численных результатов с данными экспериментов, с аналитическими, численными и экспериментальными данными, полученными другими авторами.

Практическая ценность работы определяется: разработкой методики, алгоритма и прикладного программного обеспечения, позволяющих проводить анализ и проектирование ТБ элементов, используемых в конструкциях современных технических устройств; получением новых результатов, связанных с расчетом и анализом ТБ элементов различных конфигурации; выдачей рекомендаций по рациональному проектированию ТБ элементов сложной геометрической формы.

Результаты диссертационной работы внедрены в ОАО «Калужский турбинный завод» г. Калуга и в ООО НТЦ «Расчетные технологии» г. Москва при расчетах и проектировании предохранительных устройств.

Апробация работы Основные положения диссертационной работы докладывались на 5-й международной конференции «Механизмы внедрения новых направлений науки и технологий в системы образования», (Москва,

октябрь 2004г.), 5-й конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH,(Москва, Апрель 2005), 5-й международной конференции «Молодые учёные- промышленности, науке, технологиям и профессиональному образованию: проблемы и новые решения», (Москва, июнь 2005г.), региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, (КФ-МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, апрель 2005г.)

Публикации По теме диссертации опубликовано 4 работы.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, 98 рисунков, 4 таблиц и списка литературы из 179 наименований, изложенных на 161 страницах машинописного текста.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, научная новизна и практическая ценность, формулируются цели и задачи исследования.

Приводится описание различных видов оболочечных ТБ элементов с дискретной рабочей характеристикой, применяемых в конструкциях современных электротехнических устройств. Отмечается, что в современных контактно-коммутационных устройствах используются все более совершенные и сложные конструкции ТБ элементы с дискретной упругой характеристикой. Известны удачные единичные попытки эмпирического нахождения элементов сложной формы, обеспечивающих требуемые характеристики, которые как правила запатентованы.. Научно обоснованную методику проектирования подобных элементов в доступных авторам источниках найти не удалось.

В этой связи задача расчета и проектирования ТБ элементов является актуальной, особенно, в свете появления серии ТБ устройств нового поколения, использующих явление “хлопка” и предварительные настройки на дискретное срабатывание при заданной температуре.

Первая глава посвящена обзору методов расчета и проектирования ТБ элементов. В историческом контексте обсуждаются методы нелинейного анализа ТБ конструкций. Анализируются работы, посвященные вопросам расчета различных ТБ элементов, акцент ставится на проблемах геометрически нелинейного анализа. Описываются ТБ элементы и устройства, использующие ТБ элементы, применяемые в различных областях техники.

Основы теории расчета ТБ элементов заложены в трудах У. Вилларсо, С.П. Тимошенко, Д.Ю.Панова, В.И. Феодосьева, Э.И. Григолока. Использование упругих чувствительных ТБ элементов на практике, а также вопросы теории и аналитические методы расчета ТБ элементов нашли отражение в монографиях С.Д. Пономарева, Л.Е. Андреевой, Ф. Кашпара, К.Д. Тимошенко, В.Н. Минаева, С.Я. Гордиенко и др.

Существенный вклад в развитие теории и практики расчета термометаллических конструкций внесли Э.Л. Аксельрад, А. И. Воробьев, С.С. Гаврюшин, В.Я. Гинзбург, Е.И. Лазорина, В.И. Королев, В.В. Алексеевский, В. Н. Худик, В. В. Повисок и М. П. Федрук и др. За рубежом вопросами термометалла занимались W.H. Wittrick, D.M. Myers, W.H. Blumden, M.F. Heary, L.F. Coffin, B.D. Aggarwala, E. Saibel и др.

Среди ТБ элементов выделяется класс элементов с дискретной рабочей характеристикой. Поскольку первые элементы с дискретной характеристикой имели форму пологого осесимметричного купола, такие элементы известны в литературе как *термометаллические диски*. Типичная рабочая характеристика ТБ диска, т.е. зависимость между перемещением характерной точки элемента и изменением температуры окружающей среды – T приведена на рис. 2.

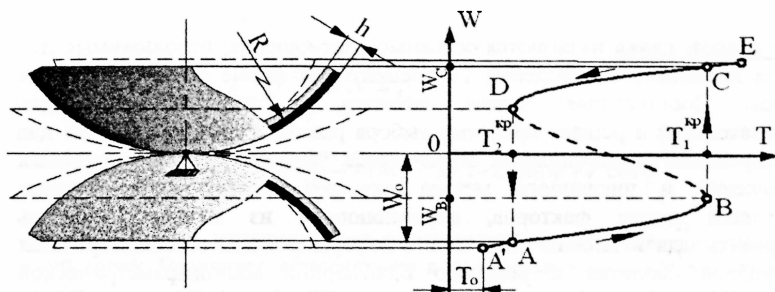


Рис. 2 Рабочая характеристика термометаллического диска.

Особенностью данной характеристики является скачкообразное изменение формы элемента при достижении критической температуры $T_1^{кр}$. Перескоку соответствует отрезок BC на характеристике. При охлаждении диска до $T_2^{кр}$ реализуется обратный перескок – отрезок DA.

К настоящему времени разработаны эффективные методы, позволяющие проанализировать процесс нелинейного деформирования ТБ дисков. Методики позволяющие решать задачи анализа и синтеза элементов более сложной формы в доступной автору литературе отсутствуют.

На основе анализа большого числа литературных источников отмечается необходимость разработки уточненных методов и алгоритмов, позволяющих исследовать существенное нелинейное поведение ТБ элементов сложной формы. Особое внимание уделяется развиваемым в последнее время подходам к исследованию многопараметрических задач нелинейного деформирования ТБ конструкций, обосновывается необходимость разработки численной методики расчета и анализа рабочей характеристики и напряженно-деформированного состояния класса ТБ элементов. Формулируются основные задачи работы, связанные с исследованием

сложных нелинейных процессов деформирования ТБ элементов контактно-коммутационных устройств.

Подчеркивается, что анализ более простых осесимметричных аналогов для сложных тонкостенных неосесимметричных оболочечных ТБ элементов позволяет существенно сократить время проектирования ТБ элементов сложной формы на базе использования современных программных комплексов. Расчеты элементов по осесимметричной схеме помимо самостоятельной ценности могут использоваться для предварительных расчетов, в ходе которых определяются основные параметры для элементов, не обладающих осевой симметрией. Для чистовых расчетов и анализа рабочих характеристик и НДС термометаллических элементов сложной геометрической формы в работе используется метод конечных элементов.

Предлагаемые алгоритмы позволяют осуществить переход от задачи анализа к задаче синтеза ТБ элемента с заданной рабочей характеристикой.

Во второй главе излагаются основные соотношения, используемые для анализа нелинейного поведения ТБ элементов в форме осесимметричных куполов. Поставленная задача является, в определенной мере, вспомогательной и решает проблему выбора рациональных параметров для проектирования более сложных оболочечных элементов. Выбор основных соотношений и численного метода для их последующего решения определялся рядом факторов, определяющим из которых являлась размерность задачи. Анализ нелинейного деформирования осесимметричных ТБ куполов сводится к решению одномерной многопараметрической нелинейной краевой задачи, алгоритм решения которой известен. В качестве исходных соотношений используется модифицированный вариант теории тонких осесимметричных оболочек, использующий гипотезу Кирхгофа-Лява. Соотношения подготовлены для применения метода, основанного на сведении нелинейной краевой задачи к системе нелинейных операторных уравнений и задаче Коши.

При описании геометрии ТБ оболочки, отсчетная поверхность совмещается со слоем спая. Для описания физико-механических свойств используется модель линейно упругого материала. В качестве независимой переменной рассматривается лагранжева координата S_0 , отсчитываемая вдоль меридиана ТБ оболочки в недеформированном состоянии (рис.3). Полагается, что материал оболочки следует закону Гука, при этом коэффициенты Пуассона $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, а модули упругости E_i и коэффициенты линейного расширения материала α_i для верхнего ($i = 1$) и нижнего ($i = 2$) слоев оболочки являются известными функциями S_0 и постоянны по толщине. Толщины нижнего и верхнего слоев, обозначенные как h_1 и h_2 , также являются известными функциями дуговой координаты S_0 и подчиняются известному соотношению Виларсо.

Геометрические соотношения рассматриваемого варианта уравнений осесимметричных оболочек записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}\frac{dv}{dS_o} &= (1 + \varepsilon_{mo}) \sin \psi - \sin \psi_o, \\ \frac{du}{dS_o} &= (1 + \varepsilon_{mo}) \cos \psi - \cos \psi_o, \\ \frac{d\psi}{dS_o} &= (1 + \varepsilon_{mo}) \kappa_{mo} + \frac{d\psi_o}{dS_o}.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь ψ_o и ψ - начальный и текущий угол наклона касательной к меридиану; u и v - горизонтальная и вертикальная компоненты перемещений в текущей точке; ε_{mo} , ε_{io} , κ_{mo} и κ_{io} - деформации и изменения главных кривизн элемента поверхности спая. Уравнения равновесия для деформированного состояния имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{dU}{dS_o} &= -(1 + \varepsilon_{mo}) \left(\frac{\cos \psi}{X_o + u} U - \frac{N_t}{X_o + u} + P_u \right), \\ \frac{dV}{dS_o} &= -(1 + \varepsilon_{mo}) \left(\frac{\cos \psi}{X_o + u} V + P_v \right), \\ \frac{dM_m}{dS_o} &= -(1 + \varepsilon_{mo}) \left(\frac{\cos \psi}{X_o + u} (M_m - M_t) - U \sin \psi + V \cos \psi \right).\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь q_u и q_v - интенсивности распределенной нагрузки. X_o - радиус текущей точки. Величины, относящиеся к недеформированному состоянию, обозначаются нижним индексом «о». Для обозначения величин, соответствующих меридиональному направлению используется нижний индекс «m», а окружному - «t».

Нормальная - N_m и поперечная - Q_m силы в площадке, перпендикулярной к меридиану связаны с горизонтальной - U и вертикальной - V составляющими внутреннего усилия при помощи матрицы поворота, зависящей от текущего значения угла ψ (рис. 3)

$$\begin{Bmatrix} N_m \\ Q_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix}\quad (3)$$

В предположении справедливости гипотезы о двухосном напряженном имеют место следующие выражения для силовых факторов:

$$\begin{aligned}N_m &= C_1 \varepsilon_{mo} + C_2 \varepsilon_{io} + D_1 \kappa_{mo} + D_2 \kappa_{io} - B_1 T, \\ N_t &= C_1 \varepsilon_{io} + C_2 \varepsilon_{mo} + D_1 \kappa_{io} + D_2 \kappa_{mo} - B_1 T, \\ M_m &= -D_1 \varepsilon_{mo} - D_2 \varepsilon_{io} - C_3 \kappa_{mo} - C_4 \kappa_{io} + B_2 T, \\ M_t &= -D_1 \varepsilon_{io} - D_2 \varepsilon_{mo} - C_3 \kappa_{io} - C_4 \kappa_{mo} + B_2 T.\end{aligned}\quad (4)$$

T - изменение температуры. Постоянные коэффициенты C_i , B_i , D_i ($i=1,2$) определяются исходя из физико-механических свойств материалов.

Неизвестные, производные которых входят в уравнения (1,2), рассматриваются как *основные* неизвестные, неизвестные не входящие в этих соотношения под знак дифференциала рассматриваются как *вспомогательные*, поскольку они могут быть выражены через основные неизвестные с помощью следующих алгебраических соотношений:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{mo} &= \frac{1-\mu^2}{E_1 h_1 + E_2 h_2} (U \cos \psi + V \sin \psi) - \mu \frac{u}{X_0} + \frac{T(1+\mu)}{E_1 h_1 + E_2 h_2} (E_1 h_1 \alpha_1 + E_2 h_2 \alpha_2), \\ \kappa_{mo} &= \frac{3(1-\mu^2)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3} M_m - \mu \frac{X_0 + u}{X_0} \left(\frac{\sin \psi}{X_0 + u} - \frac{\sin \psi_0}{X_0} \right) + \frac{3T(1-\mu)}{2(E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3)} (E_1 h_1^2 \alpha_1 + E_2 h_2^2 \alpha_2), \\ N_t &= \frac{E_1 h_1 + E_2 h_2}{1-\mu^2} + \left(\frac{u}{X_0} + \mu \varepsilon_{mo} \right) - \frac{T}{1-\mu} (E_1 h_1 \alpha_1 + E_2 h_2 \alpha_2), \\ M_t &= \frac{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3}{3(1-\mu^2)} \left[\frac{X_0 + u}{X_0} \left(\frac{\sin \psi}{X_0 + u} - \frac{\sin \psi_0}{X_0} \right) + \mu \kappa_{mo} \right] - \frac{T}{2(1+\mu)} (E_1 h_1^2 \alpha_1 + E_2 h_2^2 \alpha_2)\end{aligned}\quad (5)$$

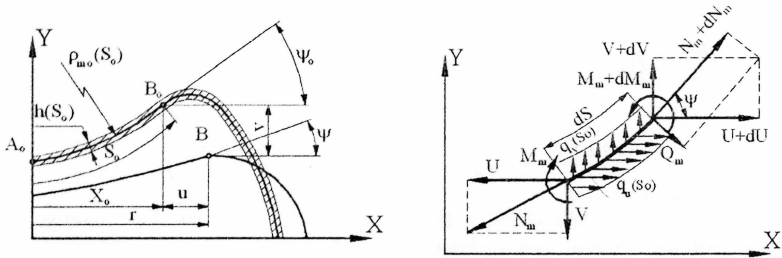


Рис.3. К выводу дифференциальных соотношений, описывающих нелинейную деформацию осесимметричных ТБ куполов.

Вектор состояния в текущем сечении оболочки запишется в виде:

$$X^T = [v, u, \psi, V, U, M_m] \quad (6)$$

Анализ процесса нелинейного деформирования сводится к решению нелинейной краевой задачи для системы нелинейных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\bar{X}}{dS_0} = \bar{F}(S_0, \bar{X}, \bar{Q}), \quad (7)$$

дополненной соответствующими краевыми условиями. Здесь $\bar{Q}$ -векторный параметр, характеризующий воздействующие на систему внешние возмущения.

Рассматриваются основные расчетные модели, используемые для описания процессов нелинейного деформирования ТБ элементов. Кратко излагаются основные соотношения МКЭ и описываются конечные элементы, применяемые для расчета ТБ элементов.

В третьей главе излагается методика численного анализа нелинейных процессов деформирования ТБ элементов в рамках многопараметрического подхода. При таком подходе решение задачи (7) сводится к решению кусочно-гладкой последовательности однопараметрических задач. Решение строится, как последовательное решение нелинейных однопараметрических задач в предположении, что изменяется только один из внешних параметров, остальные внешние параметры в пределах кусочно-гладкого участка, фиксируются по своим последним значениям на предыдущем однопараметрическом участке. Движение по параметру осуществляется на основе двухшагового итерационного метода: «предиктор-корректор». На этапе «предиктор» осуществляется предсказание решения на основе информации, накопленной на предыдущих шагах по параметру. На этапе «корректор» производится уточнение предсказанного решения.

Приводится описание алгоритма и программной реализации предлагаемого метода. Описывается программа, разработанная для расчета ТБ элементов в форме осесимметричных куполов. Приводится блок-схема и подробное описание составных частей программы, необходимой входной информации и получаемых результатов.

Использование предложенного алгоритма позволяет перейти от решения задачи анализа к решению задачи синтеза конструкции. Идея перехода иллюстрируется на примере синтеза конструкции ТБ переключателя, используемого в качестве элемента быстродействующего термореле. Настройка ТБ диска на переключение при заданном значении температуры T^* производится посредством регулировочного винта. Независимыми параметрами являются температура T и усилие предварительного поджатия F . Результаты численного анализа представлены на рис.4 в трехмерном пространстве: температура, усилие предварительного поджатия, прогиб.

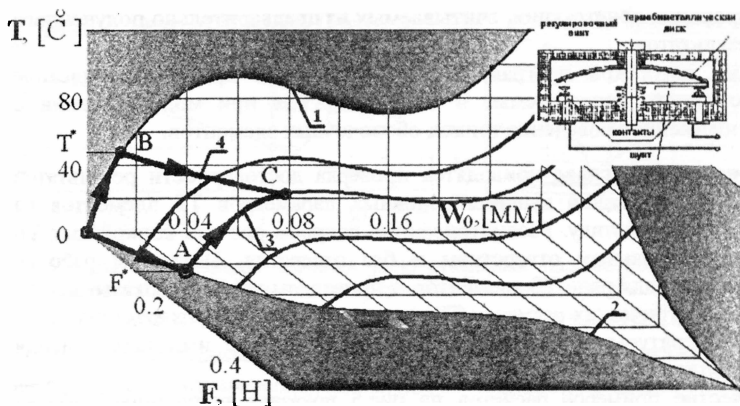


Рис. 4. Поверхность равновесных состояний ТБ купола в осях температура–нагрузка–прогиб.

Кривая 1 соответствует процессу деформирования ТБ диска при отсутствии предварительного поджата. Кривая 2 соответствует силовому нагружению элемента при постоянной температуре. Кусочно-гладкие кривые 3 и 4 соответствуют сложному процессу деформирования. Прием смены пространства управляющих параметров был применен в точках А и В.

Традиционно задача определения усилия предварительного поджата, обеспечивающего срабатывание при заданной температуре, решается методом проб. В рамках многопараметрического подхода использовалась следующая стратегия решения задачи синтеза. На первой стадии процесса производилось нагружение конструкции температурой вдоль кривой 1 вплоть до достижения заданной температуры T^* . В точке В производилась смена параметра продолжения, и дальнейшее нагружение производилось по силе, пока не достигалась особая точка С, соответствующая предельной точке для зависимости перемещение – усилие. Усилие F , соответствующее этой точке, соответствовало искомому усилию предварительного поджата F^* , обеспечивающему прощелкивание элемента при требуемой температуре T^* . Для контроля была решена задача по пути нагружения 3, которая показала идентичность полученных результатов с удовлетворительной погрешностью.

Разработанная программа позволяет, получить исчерпывающую информацию о напряженно-деформированном состоянии на любой стадии деформирования, и в любом интересующем нас меридиональном сечении элемента. В программе предусмотрены следующие виды расчета: проведение расчета от нулевой точки (от ненагруженного состояния); продолжение расчета от любой точки кривой равновесных состояний, полученной ранее; продолжение расчета со сменой параметра продолжения, граничных условий, нагрузки; просмотр результатов расчета с графическим выводом картин деформирования конструкции, считываемых из предварительно полученного файла результатов.

Помимо авторской программы в третьей главе приведено описание основные опций, используемые в ППК «ANSYS» при моделировании и анализе нелинейное поведение тонких оболочечных элементов.

В четвертой главе приводятся проверка достоверности результатов расчета и исследования влияния основных параметров ТБ элементов на рабочую характеристику. Рассматриваются вопросы расчета конкретных ТБ дисков с центральным отверстием и без отверстия. Получены рабочие характеристики для ряда ТБ элементов и приведены кривые, показывающие влияния геометрических размеров ТБ элементов на упругую характеристику, т.е. на температуры срабатывания и соответствующие им перемещения точка закрепления электрического контакта.

В качестве примеров расчетов на рис.5 показана полученная рабочая характеристика ТБ купола с геометрическими размерами и физико-механическими свойствами материалов, составляющих слоев.

Купол закреплен в центре и свободно опирается по краям. Рассматривается перемещение узла 1, предполагаемое место закрепления контакта.

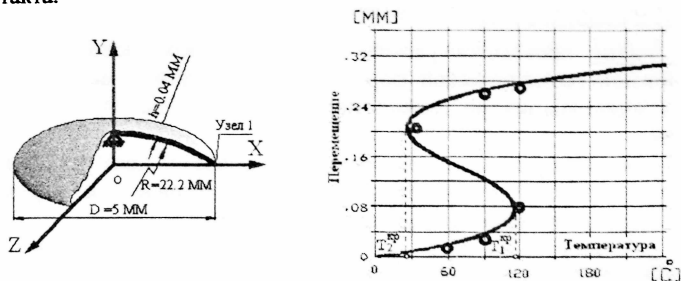


Рис.5. Рабочая характеристика ТБ купола, — - численные результаты, $\bullet$ - экспериментальные результаты.

Результаты расчета, произведенные на основе модели осесимметричного купола, показывают хорошее совпадение с результатами эксперимента.

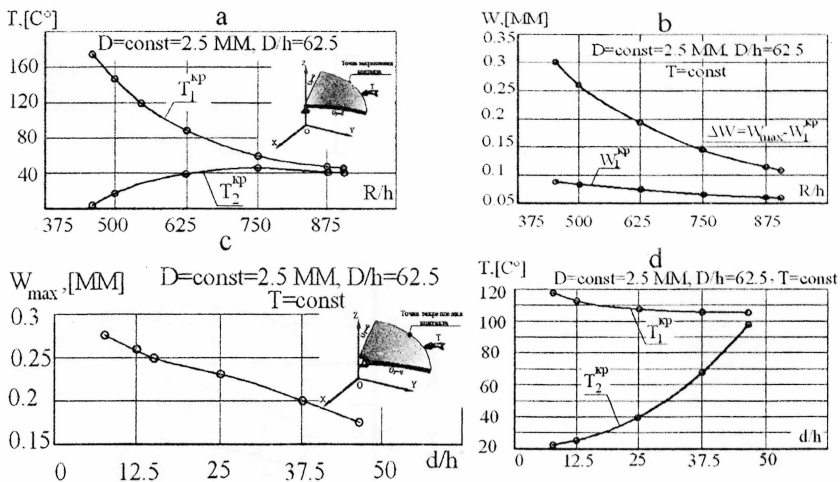


Рис.6. Результаты анализа влияния конструктивных параметров на рабочие характеристики ТБ дисков. а- влияние кривизны на температуры переключения T_1^{kp} и T_2^{kp} ; б- влияние кривизны на величину перемещения точки закрепления контакта в момент перескока W_1^{kp} и на ее перемещение при перескоке ΔW ; в- влияние радиуса центрального отверстия на максимальное перемещение точки закрепления контакта при перескоке W_{max} ; д- влияние радиуса центрального отверстия на температуры переключения T_1^{kp} и T_2^{kp} .

Приводятся результаты численного исследования влияния характерных геометрических характеристик ТБ дисков на рабочую характеристику. Часть результатов исследования приведена на рис.6.

В пятой главе проводится расчет реальных и перспективных ТБ элементов сложной геометрической формы по разработанной методике с завершающим «чистовыми» расчетами, проведенными с использованием ППК «ANSYS».

В работе приводятся результаты численных исследований трех реальных конструкций ТБ оболочечных элементов сложной геометрической формы, физико-механические свойства которых приведены в таблице 1.

Таблица.1.

Физико-механические свойства реальных исследуемых ТБ элементов.

ТБ элемент	Марка ТБ	Материал слоя		E ₁ (ГПа)	E ₂ (ГПа)	α_1 (*10 ⁻⁶ 1/С°)	α_2 (*10 ⁻⁶ 1/С°)	μ
		активного	пассивного					
Патент США №4160226	ТБ 1423	24НХ	36Н	190	150	18	1	0.3
ОАО «Калужский завод автоприбор»	ТБ 1323	19НХ	36Н	195	150	17	1.3	0.3
Завод "Техноприбор" г. Могилев, Беларусь	ТБ 1353	24НХ	36Н	100	150	20.6	1.2	0.3

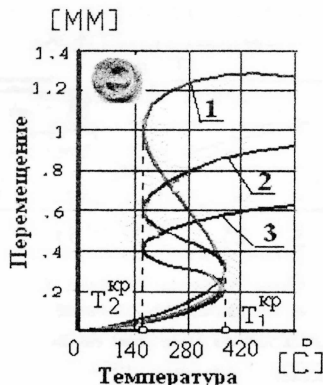
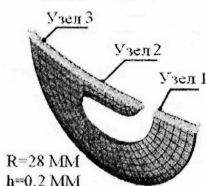
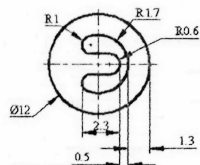


Рис.7. Геометрические размеры, К Э модель и характеристика ТБ элемента сложной формы (патент США №4160226).

Первый элемент представляет собой круглой сферической оболочкой с U-образной прорезью и язычком в центре лопасти рис.7 (патент США №4160226). Второй элемент представляет собой грушевидной сферической оболочкой с U-образной прорезью и язычком в центре лопасти и П-образным выступом рис.8 (ОАО «Калужский завод Автоприбор»). Третий элемент в виде прямоугольной пластинки со сферическим куполом в ее центре рис.9 (завод «Техноприбор» г. Могилев, Беларусь). Толщина ТБ элементов 0.2мм.

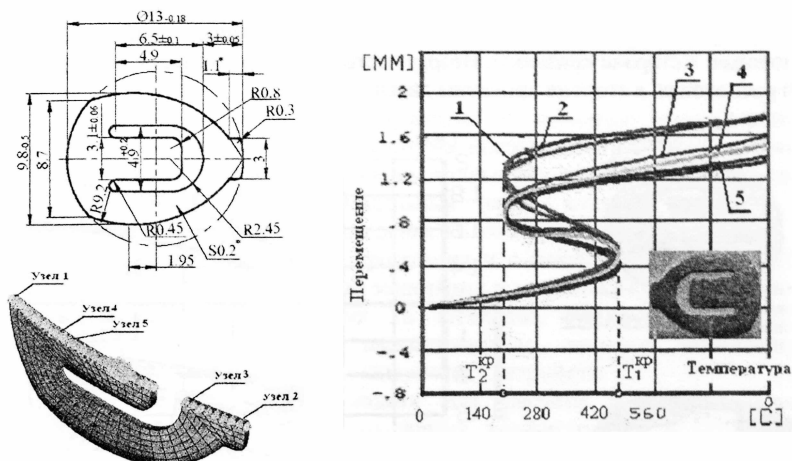


Рис.8. Геометрические размеры, К Э модель и характеристика ТБ элемента сложной формы (Калужский завод "Автоприбор").

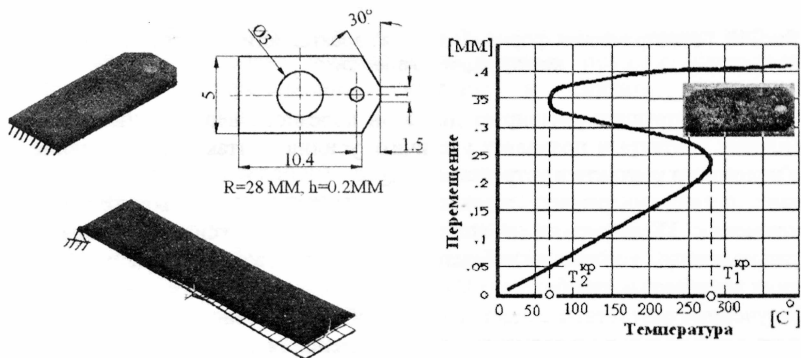


Рис.9. Геометрические размеры, К Э модель и характеристика ТБ элемента сложной формы (завод "Техноприбор" г. Могилев, Беларусь).

Для всех трех рассмотренных элементов были получены рабочие характеристики, соответствующие перемещениям в нескольких характерных точках элемента, что позволяет выбрать рациональный вариант для размещения контакта.

В результате анализа параметров и рабочих характеристик, рассмотренных ТБ элементов была предложена новая комбинированная конструкция ТБ диска рис.10, состоящей из двух части соединены друг с другом сваркой или заклепками. Первая часть представляет собой осесимметричный диск с отверстием в центре, активный слой которого расположен в стороне кривизны. Вторая часть (язычок), в которой пассивный слой расположен в стороне кривизны диска.

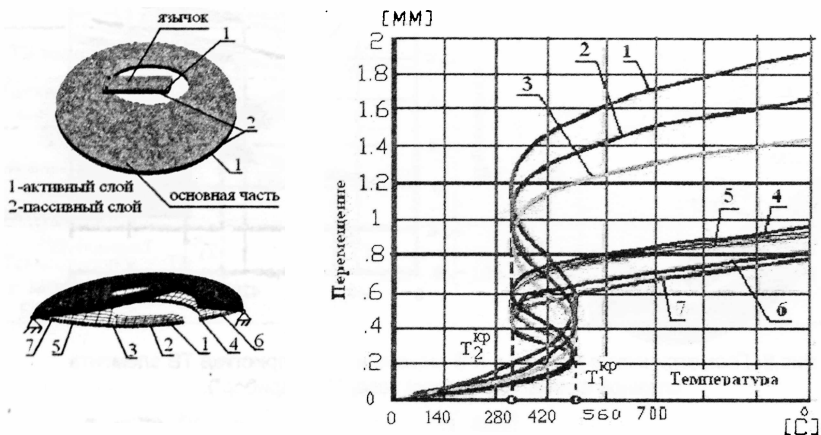


Рис. 10. Геометрическая форма и рабочая характеристика перспективной конструкции ТБ элемента.

Данная конструкция расширяет диапазон полезного перемещения точки закрепления контакта и позволяет увеличить усилия контакта, т. е. создание более надежного контакта в устройстве.

Был проведен расчет контактных усилий, возникающих при переключении ТБ элемента, и показано, что данные усилия позволяют создать надежный контакт и избежать появления нежелательных явлений искрения контактов и «дребезга».

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенной методики и возможности ее применения при расчете и анализе устройств, использующих ТБ элементы с дискретной характеристикой.

Основные результаты и выводы

1. Предложена методика численного моделирования процессов нелинейного деформирования ТБ элементов с дискретной характеристикой, позволяющая совершенствовать существующие и создавать новые конструкции ТБ элементов, с заданными техническими параметрами
2. Разработано прикладное программное обеспечение для ЭВМ, предназначенное для расчета и проектирования ТБ элементов в форме тонкостенных осесимметричных куполов, позволяющее определить область рациональных значений конструктивных параметров и, как следствие, существенно сократить процесс проектирования ТБ элементов сложной формы.
3. Достоверность результатов, получаемых с помощью разработанных алгоритмов и программ, подтверждена посредством решения тестовых задач и путем сравнения с экспериментальными данными и известными решениями эталонных и модельных задач анализа линейного и геометрически нелинейного поведения ТБ элементов.
4. С использованием авторской программы и с помощью ППК «ANSYS» получены новые результаты для модельных и тестовых задач нелинейного деформирования тонкостенных ТБ элементов, проясняющие влияние основных конструктивных параметров на процесс нелинейного деформирования и рабочую характеристику устройств.
5. Созданы параметрические модели для расчета и проектирования оболочечных ТБ элементов различных конфигураций, позволяющие, найти пути и резервы для совершенствования и создания новых конструкций ТБ элементов электротехнических устройств.
6. Выработаны рекомендации по проектированию ТБ элементов существующих электротехнических устройств и новые конструкции оболочечных ТБ элементов, соответствующие современному мировому техническому уровню, использование которых позволит существенно повысить эксплуатационные качества и снизить трудоемкость изготовления изделий.

В качестве основного вывода следует отметить, что в работе теоретически обобщена и решена прикладная научно-техническая проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение, связанная с расчетом и проектированием ТБ элементов с дискретной характеристикой, используемых в конструкциях современных технических устройств.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Али А. Карим. Расчет и проектирование оболочечных термобиметаллических элементов // Сборник научных трудов пятой международной конференции «Механизмы внедрения новых направлений науки и технологий в системы образования», М.: МГИУ 2004. С.100-103.
2. С.С. Гаврюшин, Али А. Карим. Численный анализ термобиметаллических устройств дискретного действия // Сборник трудов пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH, М.: CAD-FEM 2005.С.80-86.
3. Али А. Карим, С.С.Гаврюшин. Численный анализ термобиметаллических элементов быстродействующих электротехнических устройств // Известия ВУЗов, Машиностроение (М.). – 2005. -№8. -С.17-23.
4. Али А. Карим. Численный анализ термобиметаллических элементов электротехнических устройств/ Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С.69-72.