

1147/138

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ЩЕРБАКОВ КИРИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

УДК 539.37: 531.781(031)

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
УПРУГИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ОГ.02.06 - Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 1988.

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор
В.И.УСКИН

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Б.Н.УШАКОВ

кандидат технических наук,
доцент
С.Н.ЕГОРОВ

Ведущее предприятие - Центральный аэро-гидродинамический
институт им. Н.Е.Жуковского

Защита состоится "23" июня 1988 г. на заседании
специализированного Совета Д053.15.08 при Московском высшем
техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5.

Отзыв
читать у
на имя
и про
Н.Э.Е

Доверенные пе-
выше адресу
а "Динамика
в МВТУ им.
Г.

от
д

М471/38

Подп.

Типо

И.ДУБИНИН

кв., зак. № 564

Актуальность проблемы. Формообразование упругим деформированием представляет собой эффективный способ получения отражающих оптических поверхностей с требуемыми оптико-энергетическими характеристиками. Он позволяет создавать упругие оптические элементы (УОЭ) с изменяемой формой и регулируемыми выходными параметрами, упрощает технологические процессы получения поверхностей двойной кривизны. УОЭ все более широко применяются в оптике, в астрономии, в лазерных системах, в физических исследованиях, в высокотемпературных гелиотехнических и др. установках. Известны гелиоустановки, насчитывающие тысячи упругих зеркал. Роль способа возрастает с развитием адаптивной оптики. Остро стоит вопрос о повышении прочности, надежности и долговечности УОЭ, о поиске оптимальных конструктивных и технологических решений, о снижении их себестоимости.

Формообразование УОЭ обладает следующими особенностями. Во-первых, получение требуемой формы сводится к выбору таких статических, геометрических, жесткостных и др. параметров, типов приводов и схем их расположения, при которых деформации, напряжения и аберрационные характеристики не превышают допустимых значений. Во-вторых, многие конструктивные и технологические факторы (реальные условия закрепления и нагружения, зазоры и перекосы, неплоскостность исходной формы, краевые эффекты и др.) не поддаются математическому моделированию и исследуются экспериментально. Эксперимент обеспечивает проверку правильности проектного решения, технологии изготовления и сборки. Поэтому исследования УОЭ носят комплексный характер с использованием экспериментальных методов, предполагая совместное решение задач теории оболочек, оптики, а для концентрирующих систем - переноса излучения.

Возможности известных экспериментальных методов (тензометрических, оптических, профилометрических, калориметрических, радиационных и др.) в задачах формообразования УОЭ ограничены. Каждый из них, позволяя решать частные вопросы, не обеспечивает выбор рациональных конструктивных параметров УОЭ и совместное исследование напряженно-деформированного состояния (НДС), оптико-энергетических характеристик и параметров регулирования формы с высокой точностью результата. Поэтому актуальна разработка специальных методов расчета и испытаний.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1471138

Щербаков Ю. К. Разработка ми

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Цель работы. Основной целью диссертации является разработка эффективного метода анализа формообразования упругих оптических и концентрирующих зеркал, который обеспечивает получение УОЗ с заданными характеристиками. Он должен способствовать решению таких практических задач, как выбор рациональных параметров упругих зеркал на этапах проектирования и изготовления, определение НДС, абберационных и энергетических характеристик как критериев качества, расчет оптимальных параметров регулирования и предельных геометрических параметров, оперативный контроль формы при испытаниях в лабораторных и производственных условиях.

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

1. Предложен новый теоретико-экспериментальный метод анализа параметров формообразования УОЗ. Он позволяет экспериментально изучать те факторы, которые не поддаются расчету или вызывают вычислительные трудности, а в остальном задача решается теоретически и численно. Метод обеспечивает решение практических задач на этапах проектирования, изготовления и испытаний УОЗ, позволяет обоснованно выбрать рациональные проектные параметры, получить полную информацию о НДС, о жесткостных и оптико-энергетических характеристиках, определить оптимальные фокальные параметры реальных зеркал и параметры регулирования формы.

2. В рамках предложенного метода разработаны теоретические основы исследования формы и деформаций упругих зеркал произвольной формы с применением методов муара и отраженного раstra. Предложены способы и устройства для измерения формы и деформаций зеркальной поверхности в реальном масштабе времени и при двукратной регистрации с применением новых одно- и двухосевых оптических схем. Создана методика расшифровки полученной информации для поверхностей двойной кривизны. Изучен эффект несовпадения теоретических и реальных центров полос муара при чистом изгибе зеркал. Исследованы вопросы нормирования точности измерений.

3. Разработан вариант определения напряженного состояния упругих зеркал типа гибких пологих оболочек, пластин и мембран при экспериментальном изучении формоизменения зеркальной поверхности. При этом напряжения в срединной поверхности определяются с использованием математических аналогий.

4. Предложенный метод позволил изучить влияние различных конструктивных факторов на основные характеристики УОЗ и получить новые данные об особенностях их формообразования.

Достоверность результатов подтверждается их сопоставлением с решениями тестовых задач. Нормирование погрешностей обеспечивает требуемую точность измерений и расчета.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что разработанный метод расширяет возможности исследований промышленных и модельных образцов в условиях их изготовления, испытания и контроля, способствует поиску рациональных конструктивных решений и рациональной технологии. Предложены новые конструктивные решения УОЗ. Разработки и практические рекомендации внедрены в практику проектирования и испытаний УОЗ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных семинарах "Оптико-геометрические методы исследований деформаций и напряжений" (г.Киев, 1972 г.; г.Челябинск, 1975г.; г.Днепропетровск, 1978г.; пос. Менделеево, 1982г.), на УИ Дальневосточной конференции по теории мягких оболочек (г.Владивосток, 1979г.), на Всесоюзной конференции "Экспериментальные методы исследований деформаций и напряжений" (г.Киев, 1983г.), на семинарах кафедры Машиностроительного факультета МВТУ им. Н.Э.Баумана (г.Москва, 1984г., 1985г., 1986г.).

Публикация. Основное содержание диссертации отражено в 15 статьях, в четырех отчетах по НИР. Получено 12 авторских свидетельств на изобретения.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложения. Объем диссертации - 242 стр., в том числе 145 стр. машинописного текста, 86 рис. и 17 табл., список литературы из 117 наименований, приложение.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении дана классификация УОЗ, рассмотрены проблемы, возникающие при их разработке. Показана актуальность работы. Сформулированы цель диссертации и сущность предлагаемого метода.

Проведен анализ известных методов исследований формообразования УОЗ. Показаны преимущества экспериментально-расчетного метода, который используется в гелиотехнике и развит в работах С.А.Азимова, Л.А.Дубровского, Ю.А.Дудко, Р.А.Захидова, И.И.Пирматова и других авторов. Он состоит в том, что экспериментально определяется форма деформированного зеркала, а путем расчета - энергетические характеристики как критерии качества. Это позволяет учесть различные конструктивные и технологические факторы.

Недостатками этого метода являются эмпирический подбор системы сил и опор, невозможность исследования НДС, измерение прогибов (с помощью индикаторов часового типа в ограниченном числе точек), а не угловых характеристик, отсутствие визуального контроля формы, численное дифференцирование данных со случайными ошибками, что приводит к заметным погрешностям, и др. Эти недостатки устранены в предлагаемом методе.

Особенности предлагаемого метода в том, что 1) для сужения области поиска рациональных параметров определяются условия получения точных зеркал из решений обратных задач теории оболочек (пластин); 2) на этапе реализации решений обратных задач конструктивные и технологические факторы, не поддающиеся расчету или вызывающие вычислительные трудности, исследуются экспериментально на натурных или модельных образцах с помощью зеркально-геометрических¹⁾ или интерференционных методов; 3) для сокращения объема экспериментальных работ и повышения точности результата экспериментально изучаются форма и формоизменение УОЗ, а их НДС, оптико-энергетические характеристики, оптимальные параметры регулирования, предельные геометрические и статические параметры рассчитываются на ЭВМ; 4) составление плана эксперимента и широкое обобщение данных единичного опыта обеспечиваются с привлечением аппарата теории подобия. Поскольку экспериментальные данные являются исходными для последующего корректного решения задачи, метод предъявляет высокие требования к точности и к технике эксперимента. Теоретические основы метода, методики измерения и расчета описаны в главах I-3.

В первой главе изложены сущность и теоретические основы метода. При анализе условий формообразования и расчета НДС использована теория тонкостенных пологих оболочек, развитая в работах В.В.Новожилова, А.П.Филина и др. авторов. Основные уравнения приведены к виду

$$A_i \Phi + B_i \omega + C_i (\Phi, \omega) + \bar{q}_i = 0 \quad (i=1,2) \quad (I)$$

где Φ - функция напряжений, ω - прогибы, $\bar{q}_i$ - функция, учитывающая нормальные нагрузки и температурные деформации, A_i, B_i, C_i -

¹⁾ К зеркально-геометрическим методам относим методы отраженной сетки, проектируемой сетки, муара и др. Они позволяют изучать форму и деформации зеркальных поверхностей с помощью растров, марок, светящихся точек и других базовых фигур; мерой измерения служит изменение их геометрии и местоположения.

дифференциальные операторы. Эти уравнения описывают формоизменение срединной поверхности УОЗ, справедливы для оболочек переменной толщины, учитывают геометрическую нелинейность деформаций и ортотропные свойства материала. Несовпадение отражающей и срединной поверхностей учтено с помощью соответствующих зависимостей.

На основе уравнений (I) рассмотрены возможности расчета условий формообразования точных УОЗ с помощью обратных задач теории оболочек. При решении обратных задач в отличие от задач в прямой постановке задают функцию прогибов, а из разрешающей системы уравнений определяют искомые статические и геометрические параметры и граничные условия. Дан анализ основных типов этих задач и известных решений (труды Х.М.Муштари, Н.С.Ганиева, Ю.А.Солодянникова, В.И.Усюкина, Д.Ашвелла, Ж.Леметра, У.Рао и др.). Каждый тип обратных задач отличается независимыми параметрами в выбранной математической модели. Так, в обратной задаче I типа определяются внешние нагрузки и граничные условия при заданных исходной и конечной формах поверхности, жесткостных характеристиках и температурном поле. Другие типы обратных задач позволяют определить функцию цилиндрической жесткости при заданной системе сил (задача II типа), или исходную форму зеркал (задача III типа), или искомое температурное поле (задача IV типа) и соответствующие граничные условия. Эти задачи можно считать методологической основой проектирования безабберационных УОЗ. Приведены результаты исследования условий формообразования эллипсоидных и параболоидных УОЗ в геометрически нелинейной и линейной постановках, выполненных автором. Рассмотрены ортотропные и изотропные упругие элементы постоянной и переменной толщины с исходной плоской формой зеркала и с разной геометрией в плане, а также УОЗ типа мембран со свободным и закрепленным контуром. Решения получены вариационным методом Бубнова-Галёркина.

На этапе практической реализации решения обратных задач в результате конструктивных, технологических и др. факторов у УОЗ возникают абберации и концентрации напряжений. Например, реализация обратной задачи I типа часто сводится к анализу статически эквивалентных схем нагружения, которые согласно принципу Сен-Венана сопровождаются локальными краевыми эффектами. Влияние этих факторов на форму УОЗ исследуется экспериментально. Экспериментальный анализ и поиск рациональных решений составляет итерационную последовательность. При этом за показатели качест-

ва приняты НДС и оптико-энергетические характеристики. Расчет НДС и характеристик проводится по данным измерений форм и формоизменения натуральных УОЗ или их моделей. Показано, что для проведения этих измерений наиболее эффективны зеркально-геометрические и интерференционные методы; зеркально-геометрические методы обеспечивают изучение угловых характеристик зеркал.

Изложен вариант исследований НДС УОЗ типа гибких полых оболочек, пластин и мембран с использованием зеркально-геометрических и интерференционных методов. Согласно ему задачи решаются последовательно в два этапа. На первом этапе определяются функции кривизн $\mathcal{K}_x, \mathcal{K}_y$, кручения $\mathcal{K}_{xy}$ и температур $T(x, y, z)$ УОЗ при заданных нагрузках и граничных условиях; этой информации достаточно для определения напряжений изгиба. На втором этапе из решения уравнений (I) изучаются усилия в срединной поверхности УОЗ при заданных усилиях в срединной поверхности контура, известных функциях кривизн и температур. При этом уравнения (I) запишутся в форме

$$A_i \Phi = u_i, \quad u_i \in \bar{U}_i \quad (i=1,2), \quad \Phi \in \bar{\Phi}, \quad (2)$$

где $u_i = F_i(\mathcal{K}_x, \mathcal{K}_y, \mathcal{K}_{xy}, T) + q_n$, $u_2 = F_2(\mathcal{K}_x, \mathcal{K}_y, \mathcal{K}_{xy}, T)$, $\bar{U}_i$ - пространство результатов измерений, $\bar{\Phi}$ - пространство искомых функций напряжений, q_n - нормальные нагрузки. Отыскание функции Φ сводится к решению одного из уравнений (2). Предпочтительно решение уравнения совместности деформаций ($i=2$), поскольку число операций дифференцирования экспериментальных данных здесь минимально. Рассмотрен вариант решения, основанный на математической аналогии между этим уравнением и уравнением изгиба "жестких" пластин. Изучены условия приближенной и точной реализации этой аналогии для гибких оболочек из ортотропных и изотропных материалов. Показано, что для изучения функции напряжений достаточно исследовать изменение кривизн и кручения модели жесткой пластины (аналога) при геометрическом подобии ее контура и контура оболочки (объекта) и при соответствующих граничных условиях и внешней нагрузке. Приведено экспериментальное решение тестовой задачи с использованием метода муара на установке автора.

Основы расчета оптических и энергетических характеристик при известной форме поверхности зеркал, предназначенных для формирования изображений и концентрации лучистой энергии, сформулированы с использованием известных работ в области оптики (И.А. Тудоровский, Б.В. Фёдоров и др.) и гелиотехники (И.В. Баум, В.А. Грилихес, Р.А. Захаров, Д.И. Тепляков, Г.Я. Умаров и др.). Предло-

жено расчет выполнять в два этапа: вначале определять оптимальный фокальный параметр, которому соответствуют наилучшие оптико-энергетические характеристики, а затем значения этих характеристик. Для зеркал, формирующих изображение, за функционал качества принят известный в дифракционной оптике критерий Штреля, приведенный к зависимости, полученной Марешалем. В качестве оптических характеристик взяты волновые аберрации и дисперсия линейных отклонений. Для концентрирующих зеркал за энергетические характеристики приняты облученность, равновесная температура, коэффициент концентрации, размер фокального пятна, дисперсия угловых отклонений. В расчетной схеме среда принята диатермической, зеркальная поверхность – оптически гладкой, учтены переменная яркость и конечные угловые размеры источника света. Расчет сводится к совместному решению уравнений, описывающих геометрические и физические свойства системы Источник – УОЗ – Приемник и перенос излучения. Функционал качества концентрирующих зеркал сформулирован на основе законов теоретической фотометрии. Он характеризует максимальную облученность в фокальной плоскости. Показано, что для УОЗ оптимальным фокальным параметрам и характеристикам соответствуют ближайшие поверхности. Параметры ближайших поверхностей определяются из условия максимума принятых функционалов. При этом для каждого реального зеркала в зависимости от его назначения (получение изображений или концентрация энергии) существуют две ближайшие поверхности с разными фокальными параметрами.

Рассмотрены вопросы физического моделирования рационального формообразования УОЗ. Установлен вид безразмерных напряжений, оптико-энергетических характеристик и параметров регулирования формы. Критерии подобия предполагают аффинное подобие между моделью и натурой. Разработан вариант моделирования УОЗ, когда форма и деформации зеркал исследуются на аффинно-подобных моделях, а НДС, оптико-энергетические характеристики рассчитываются на ЭВМ. Это упрощает процесс исследований. Вариант позволяет на основе единичного эксперимента определить оптимальные параметры регулирования формы и предельные размеры УОЗ при заданных ограничениях.

Вторая глава посвящена анализу возможностей и развитию зеркально-геометрических методов исследований форм и изгибных деформаций отражающих поверхностей УОЗ. Приведена их классификация. Разработаны теоретические основы исследований поверхностей

двойной кривизны. Предложены новые способы измерений и устройства, расширяющие возможности разработанного метода анализа. Изучены погрешности измерений и вопросы их нормирования.

На основе известных работ отечественных и зарубежных авторов (С.К.Галаянт-Головский, Б.Н.Колесов, Б.Г.Леонов, Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, Н.М.Тимофеев, А.М.Трухлов, П.Дантю, В.Кепке, П.Теокарис и др.) дан обзор зеркально-геометрических методов и анализ схем измерений. Их разновидностью является метод муара. Он развит в трудах Б.Н.Андреевой, В.В.Новицкого, И.П.Сухарева, Б.Н. Ушакова, А.Дюрелли, Б.Камерайтовой, К.Остерби, П.Теокариса, Ф. Чанга и других авторов применительно к задачам изгиба пластин и цилиндрических оболочек. Его достоинства в том, что он позволяет измерять прогибы, угловые характеристики и кривизны зеркальных поверхностей. Однако для его применения в рамках метода анализа формообразования необходимы разработка эффективных схем измерений в реальном масштабе времени, решение вопросов исследования УОЗ в виде оболочек двойной кривизны, совершенствование техники и повышение точности измерений. Перспективно совместное использование зеркально-геометрических методов. Эти вопросы решены в настоящей диссертации.

С привлечением законов геометрической оптики получены основные уравнения зеркально-геометрических методов. Эти уравнения определяют углы наклона φ_j ($j=x,y$) и поворота ψ_j нормалей к зеркальной поверхности произвольной формы, обеспечивают расфигуровку картин муара и отраженной сетки, позволяют с единых позиций проанализировать и уточнить известные измерительные схемы.

Изложен способ измерения формы и деформаций в реальном масштабе времени, основанный на получении эффекта муара при совмещении изображений растров, формируемых исследуемым и эталонным зеркалами в одной измерительной схеме. Предложены и исследованы двухосевые и одноосевые оптические схемы (а.с.659894, 696281, 991159, 1073571), реализующие этот способ. Они приведены на рис.1. Здесь обозначены: 1 - фотокамера, 2 - базовый экран, 3 - рабочий растр, 4 - непрозрачный УОЗ, 5 - полупрозрачный УОЗ, 6 - светоделительное зеркало, 7 - эталонное зеркало не прозрачное, 8 - эталонное зеркало полупрозрачное, 9 - синтезированный растр. Схемы позволяют наблюдать, регистрировать, измерять, контролировать форму и формоизменение зеркальных поверхностей, наглядно оценивать степень приближения реальной поверхности к идеальной, обеспечить

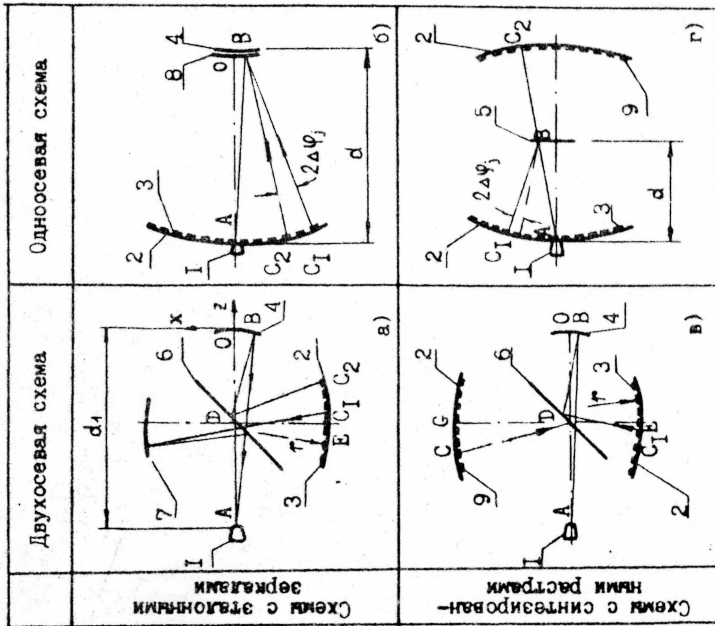
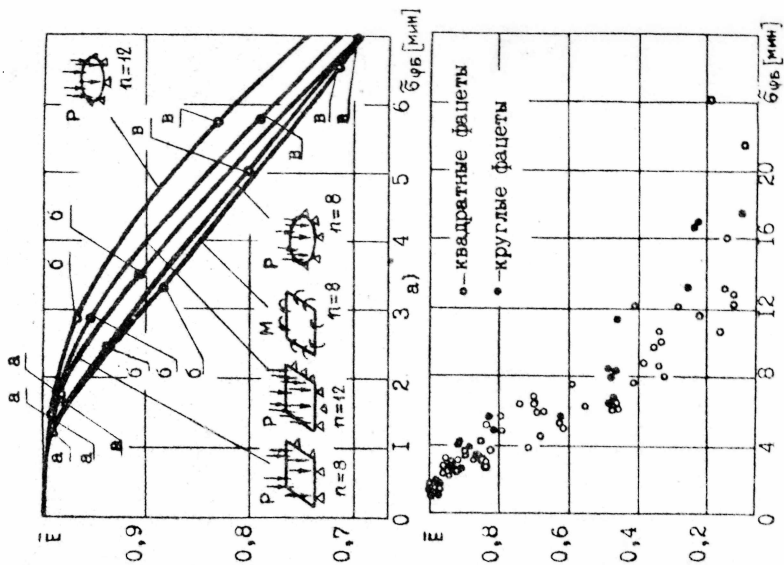


Рис. 1



оперативное регулирование формы зеркал в процессе их изготовления. Здесь опорный растр формируется эталонным зеркалом или синтетизированным растром, выполняющим функцию эталонной поверхности, полосы муара определяют угловые отклонения $\Delta\varphi_j$ реальной деформируемой поверхности от эталонной. Без эталонного зеркала и синтетизированного растра оптические схемы примут вид схем Ридера-Риттера и Литтенберга, полосам муара соответствуют углы поворота нормалей ϑ_j , а изображению ортогональной сетки - углы φ_j .

Получены уравнения, наиболее удобные для расшифровки картин муара и анализа предложенных двухосевых схем:

$$\bar{\varphi}_j = \frac{\rho_j n_j}{2d(1+K)} \quad (\bar{\varphi}_j = \Delta\varphi_j, \vartheta_j; j = x, y), \quad (3)$$

где ρ_j - шаг растра, n_j - порядок полос муара, $K=f(x, y, z, r, d, d_1, \varphi_j^\circ)$. Здесь x, y, z - координаты зеркальной поверхности, φ_j° - углы наклона зеркала до деформации, r - радиус цилиндрического экрана, $d = OD + DE$, $d_1 = AO$ (рис. I). При расположении объектива за экраном ($d=d_1$) двухосевая расчетная схема (рис. Ia) сводится к одноосевой (рис. Ib). Функция K представлена в аналитическом виде для параболоидных, цилиндрических и плоских зеркал. Рассмотрены случаи цилиндрического и плоского экрана. Показано, что в широком диапазоне параметров x, y, z, r, d, d_1 величина K для пологих УОЗ определяется в основном величиной угла φ_j° и в меньшей степени координатой z . Для плоских зеркал уравнения (3) совпадают с уравнениями, полученными В.В.Новицким и Е.Н.Андреевой. Справедливость уравнений (3) проверена экспериментально при испытаниях пологой и замкнутой цилиндрических оболочек сосредоточенными силами на установке автора (а.с. 567945).

Определены пределы применимости, особенности и эффективные параметры схем на рис. I с учетом переотражения лучей между близко расположенными зеркалами и условий существования изображений в зеркалах двойной кривизны.

Разработаны новые приемы исследований УОЗ, в том числе: предложены и использованы ортогональное совмещение двух растров на гибком цилиндрическом экране и оптическое разделение двух картин муара соответствующим выбором глубины резкости фотокамеры при исследованиях цилиндрических зеркал (а.с. 567945), способы смещения полос муара в заданную точку зеркальной поверхности в реальном масштабе времени (а.с. 1330461), способы увеличения числа полос и повышения чувствительности измерений с помощью

картин дифференциального муара. Отмечена возможность применения сферических экранов с "концентрическими" и "радиальными" растрами при исследовании УОЗ в полярной системе координат (а.с. 991156) при неосесимметричных деформациях.

Объяснен и исследован эффект несовпадения теоретических и реальных центров полос муара при чистом изгибе зеркал. Дано его теоретическое обоснование. Определены нормированные значения шагов опорного и рабочего растров, формирующих "разностный" муар. Показано, что при нарушении условий нормирования интерференционную картину формирует "суммарный" муар (С-муар), обладающий иными свойствами. Отсюда отмеченное несовпадение и методические ошибки измерений, которые могут быть значительными (более 20%). Определены условия существования эффективного С-муара, при котором погрешности отсутствуют. Предложены и разработаны приемы исключения указанных погрешностей. Они используют полосы эффективного С-муара или сочетание методов муара и отраженного растра.

Дан подробный анализ инструментальных, юстировочных и методических ошибок измерений зеркально-геометрическими методами, включая ошибки изготовления и юстировки установок, формирования изображений, обработки фотоснимков и экспериментальных данных и др. Основное внимание уделено методу муара. Показано, что минимальные предельно достижимые среднеквадратические погрешности результата равны $0,3 + 0,5 \%$ при нормировании ошибок измерений и обработки данных. Приведены рекомендуемые нормированные значения основных групп ошибок при допустимых среднеквадратических погрешностях результата, равных $0,5 \%$, $1,0 \%$, $1,5 \%$.

В третьей главе излагается методика проведения эксперимента с применением зеркально-геометрических методов, дано описание установок, моделей и алгоритма расчета искомых характеристик на ЭМ.

Последовательность проведения эксперимента включает согласование чувствительности измерений с допустимой величиной аберраций, нормирование каждого вида погрешностей (инструментальных, методических и др.), качественный и количественный анализ формы и формоизменения УОЗ. Условия нормирования обеспечиваются при юстировке установок, при проведении измерений, при обработке фотоизображений и аппроксимации экспериментальных данных. Получение необходимого числа полос муара достигается соответствующим выбором чувствительности измерений и величины нагрузок на упругие зеркала в пределах их прочности (при решении линейных за-

дач), а также с помощью способов, использующих картины дифференциального муара. Совместное применение этих приемов позволяет увеличить точность измерений в десятки раз.

Созданы лабораторная установка для исследований формообразования УОЗ и их моделей при сосредоточенных и распределенных нагрузках (а.с. 696281) и установка "МУАР"¹⁾ для формообразования и контроля формы натуральных гелиофакет. Они выполнены по одноосевой схеме (рис.1б), укомплектованы тензометрическими силовыми измерителями автора (а.с. 447587) и юстировочными устройствами, обеспечивающими выполнение требований нормирования. Фотопластины обрабатывались на двухкоординатном измерительном приборе ДИП-1 с управляющим вычислительным устройством "Электроника ДЗ-28" и автоматической регистрацией координат фотоизображения.

Программа расчета НДС и оптико-энергетических характеристик составлена на алгоритмическом языке ФОРТРАН, позволяет исследовать зеркала разной геометрии в плане, обеспечивает построение полей изофот и изотерм в фокальной и афокальной плоскостях. Экспериментальные данные аппроксимируются методом наименьших квадратов. На основе ряда тестовых задач определены условия, когда ошибки дискретизации численного расчета характеристик пренебрежимо малы. Тестовые испытания с использованием метода муара и других методов измерений подтвердили нормируемую погрешность определения прогибов и угловых характеристик (1,0 %; 1,5 %) и высокую повторяемость результатов. Точность методики расчета НДС и оптико-энергетических характеристик оценивалась при сопоставлении с точными решениями тех же задач и согласуется с точностью методики измерений.

Механические характеристики УОЗ (цилиндрическая жесткость, коэффициенты Пуассона и др.) исследовались по методике И.П.Сухарева методом муара. Погрешности, возникающие в результате эффекта С-муара, исключались с помощью разработанных приемов.

В четвертой главе изложены результаты, полученные с помощью разработанного метода анализа. Исследованы упругие зеркала, предназначенные для реконструкции оптических изображений, для лазерных и гелиотехнических систем. Эти зеркала представляют собой пластины переменной и постоянной толщины, а также мембраны с исходной плоской формой и разной геометрией контура в плане. Конечная ближайшая форма их поверхности является осесиммет-

¹⁾Разработана совместно с сотрудниками ГИКТБ НИИ АН УзССР.

ричной параболической. Условия формообразования безаберрационных поверхностей определялись из решения обратных задач. Рассмотрены разные варианты практической реализации полученных решений. Выявлено влияние различных конструктивных и технологических факторов на формирование краевых эффектов, на прочностные и оптико-энергетические характеристики.

Систематические испытания около 50 типов упругих зеркал, отличающихся конструкцией и схемой нагружения, показали, что на их форму большое влияние оказывает степень точности реализации решений обратных задач, особенно геометрических и статических граничных условий. В зеркалах переменной толщины аберрации возрастают с увеличением несоблюдения теоретического распределения толщин при заданной системе сил. Для зеркал постоянной толщины лучшие результаты дает нагружение статически эквивалентной системой сил и моментов.

Наиболее подробно изучены особенности формообразования круглых и квадратных гелиозеркал с использованием приводов сил и самоуравновешенных моментов. Эти приводы обеспечивают получение зеркал высокого качества; зеркала с приводами сил имеют меньшие зоны краевых эффектов и меньшие концентрации напряжений, зеркала с приводами моментов конструктивно более просты. Исследованы изменения прочностных, аберрационных и энергетических характеристик упругих зеркал и их особенности в процессе регулирования величины фокального параметра; при расчете энергетических характеристик было принято, что яркость солнечного диска описывается распределением Жозе. При обобщении результатов проведенных испытаний установлены корреляции между энергетическими характеристиками и величиной среднеквадратических угловых отклонений $\bar{\epsilon}_{\phi\psi}$ реальной поверхности от ближайшей идеальной. Например, на рис. 2 приведены функции $\bar{E} = f(\bar{\epsilon}_{\phi\psi})$ и корреляция между $\bar{E}$ и $\bar{\epsilon}_{\phi\psi}$ для зеркал с разными схемами закрепления и нагружения при регулировании фокального параметра в широких пределах. Оптическая ось расположена параллельно падающим лучам и перпендикулярно приемной плоскости. На рис. обозначены: $\bar{E} = E_m/E_m^E$; E_m^E — максимальные значения облученностей для реального зеркала и его ближайшей поверхности; n — число точек опор и сосредоточенных сил и моментов; номера соответствуют номерам расчетных схем на рис. 2а, индексы а, б, в — фокальным параметрам $F = 18a, 36a, 72a$ соответственно, где $2a$ — диаметр или ширина УОЗ. Кор-

реляция характеризует энергетические возможности рассмотренного класса упругих зеркал. Здесь наилучшее энергетическое качество имеют зеркала со статически эквивалентной схемой нагружения.

Полученные результаты позволяют выбрать рациональные варианты конструкций с учетом требований к их НДС и оптико-энергетическим характеристикам, определить оптимальные параметры регулирования их формы, предельные параметры и габаритные размеры. Предложены новые конструкции УОЗ, обладающие улучшенными прочностными и оптико-энергетическими характеристиками (а.с.1000692, 1093879, 1254397).

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.

1. Разработан эффективный метод анализа формообразования упругих оптических элементов типа гибких пологих оболочек, пластин и мембран. На этапах проектирования он позволяет найти рациональные параметры формообразования, на этапах изготовления, испытаний и контроля реальных (натурных) зеркал – получить полную информацию о их прочности, о жесткости и оптико-энергетических характеристиках, установить оптимальные параметры регулирования формы.

2. Разработан способ моделирования условий рационального формообразования упругих оптических элементов, при котором форма и деформации зеркал исследуются на аффинно-подобных моделях, а напряженное состояние и оптико-энергетические характеристики – на ЭМ, что существенно упрощает процесс физического моделирования.

3. Предложен и обоснован вариант экспериментального определения напряженного состояния упругих зеркал типа гибких пологих оболочек, пластин и мембран с использованием зеркально-геометрических и интерференционных методов. Здесь функции напряжений исследуются на основе математических аналогий.

4. Разработаны теоретические основы исследований форм и деформаций отражающих поверхностей двойной кривизны зеркально-геометрическими методами. Предложены способы, устройства, одно- и двухосевые схемы измерений форм и деформаций в реальном масштабе времени и при двукратном экспонировании, расширяющие возможности исследований. Изучен эффект несовпадения теоретических и реальных центров полос муара при чистом изгибе зеркал. Решены вопросы нормирования точности измерений.

5. Исследованы особенности формообразования упругих оптических элементов, предназначенных для формирования изображений,

для использования в лазерных системах и в гелиотехнике. Изучено влияние конструктивных факторов на основные характеристики зеркала, получены новые данные об особенностях их формообразования. Результаты исследований позволяют выбрать оптимальные варианты конструкций с учетом требований к их выходным характеристикам. Предложены новые способы формообразования упругим деформированием и новые конструкции упругих оптических элементов с улучшенными характеристиками.

Основное содержание диссертации отражено в 15 статьях, в четырех отчетах по НИР, в 12 авторских свидетельствах на изобретения. Основные результаты отражены в следующих работах:

1. А.с. 567945 СССР. Устройство для измерения деформаций тонкостенных цилиндрических оболочек / Ю.К.Щербаков, В.В.Бушуева, С.В.Цветков (СССР) - Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1977. - № 29. - С. 133.

2. А.с. 696281 СССР. Устройство для измерения формы и деформаций пластин / Ю.К.Щербаков (СССР) - Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1979. - № 41. - С. 157.

3. А.с. 991156 СССР. Устройство для измерения деформаций пластин и оболочек / Ю.К.Щербаков (СССР) - Бюл.//Открытия. Изобретения. - 1983. - № 3. - С. 172.

4. А.с. 991159 СССР. Устройство для измерения деформаций тонкостенных оболочек / Ю.К.Щербаков (СССР) - Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1983. - № 3. - С. 173.

5. А.с. 1000692 СССР. Концентратор солнечной энергии / Ю.К.Щербаков (СССР) - Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1983. - № 8. - С. 135.

6. А.с. 1055961 СССР. Способ определения деформаций зеркальной поверхности объекта / Ю.К.Щербаков, В.В.Бушуева (СССР) - Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1983. - № 43. - С. 120.

7. А.с. 1073571 СССР. Устройство для определения деформаций изгиба тонкостенных прозрачных объектов / Ю.К.Щербаков (СССР) - Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1984. - № 6. - С. 133.

8. А.с. 1093879 СССР. Способ изготовления оптического элемента / Ю.К.Щербаков (СССР) - Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1984. - № 19, - С. 121.

9. А.с. 1254397 СССР. Шаблон отражающего элемента двойной кривизны / Ю.К.Щербаков, Л.Е.Войнов (СССР) - Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1986. - № 32. - С. 187.

10. А.с. 1330461 СССР. Способ определения углов поворота

зеркальной поверхности / Ю.К.Щербаков (СССР) - Бюл. // Открытия. Изобретения. - 1987. - № 30. - С. 179.

11. Лакеева Л.П., Щербаков Ю.К. Погрешности при исследовании изгиба пластин методом муаровых полос // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1975. - № 6. - С. 177-180.

12. Лакеева Л.П., Щербаков Ю.К. Экспериментальное исследование деформаций оболочек методом муаровых полос // Труды МВТУ. - 1976. - № 206. - С. 93-102.

13. Сухарев И.П., Щербаков Ю.К. Геометрические методы в экспериментальных исследованиях пластин и оболочек // Геометрические методы исследования деформаций и напряжений: Тезисы докладов Всесоюз. семинара. - Челябинск, 1975. - С. 12-24.

14. Установка для экспериментального исследования формообразования деформируемых facets концентраторов лучистой энергии / Л.А.Дубровский, Ю.А.Дудко, Ю.К.Щербаков и др. // Деп. рук. ВИНТИ. - 1979. - № 2325-79. - 24 с.

15. Щербаков Ю.К. Универсальный муар-отраженный стенд // Машины, приборы, стенды: каталог МВТУ. - 1974. - Вып. № 4. - С. 82.

16. Щербаков Ю.К. Экспериментальное исследование упруго-деформируемых отражателей // Оптико-геометрические методы исследования деформаций и напряжений: Тезисы докладов III Всесоюз. семинара. - Днепропетровск, 1978. - С. 191-192.

17. Щербаков Ю.К. Вариант экспериментально-теоретического решения нелинейных задач пологих оболочек и пластин / МВТУ. - М., 1979. - 14 с. - Деп. в НИИМАШ 27.05.79. № 79-79.

18. Щербаков Ю.К. Физическое моделирование формообразования тонкостенных отражателей из анизотропных материалов упругим деформированием // Деп. рук. ВИНТИ. - 1982. - № 6396-82. - 58 с.

19. Щербаков Ю.К. Зеркально-геометрические методы в экспериментальном исследовании оболочек // Труды МВТУ. - 1982. - № 373. - С. 56-71.

20. Щербаков Ю.К. Об одном варианте конструкций фасетных отражателей с изменяемой геометрией // Гелиотехника. - 1983. - № 1. - С. 72-76.

21. Щербаков Ю.К., Таирова Л.П. Развитие и применение метода муара в задачах гелиотехники // Гелиотехника. - 1977. - № 5. - С. 9-17.

Щербаков