

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им В.П. Грязева
Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры
«Приборы управления»
« 22 » января 20 24 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой


В.В. Матвеев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине (модулю)
«Сборка, юстировка и испытания оптико-электронных приборов»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

с направленностью (профилем)
Интеллектуальные фотонные системы

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120303-01-24

Тула 2024 год

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ
Методических указаний по выполнению лабораторных работ
дисциплины (модуля)

Разработчик(и):

Дмитриев А.В., доцент, к.т.н _____
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)


_____ (подпись)

Содержание:

Общие требования

Правила техники безопасности

1. Лабораторное занятие №1. Определение остаточных напряжений в стекле
2. Лабораторное занятие №2 Технологический контроль формы полированных поверхностей
3. Лабораторное занятие №3. Контроль малой клиновидности пластин на интерферометре Чапского
4. Лабораторное занятие №4. Технологический контроль взаимного расположения рабочих поверхностей призм

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Студенты должны являться на занятия, изучив необходимые разделы лекций по данной дисциплине, в часы, предусмотренные общеинститутским расписанием занятий. Вход в аудиторию, а также выход из нее разрешается лишь в течении перерыва между занятиями.

Прежде чем начать лабораторное занятие, студент должен ознакомиться с описанием лабораторной работы. В ходе занятия студент должен делать необходимые записи в ученической тетради. Все расчеты и построения должны быть выполнены в системе СИ и по ЕСКД.

По проделанным работам каждым студентом оформляется отчет. Отчет по лабораторным занятиям заверяется преподавателем. Сдача отчетов производится в индивидуальном порядке. При этом студент должен знать задачи и цели проведенного лабораторного занятия, уметь объяснить результаты расчетов и ответить на контрольные вопросы. Отчет выполняется на листах формата А4. Образец титульного листа приведен в приложении.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных занятий на персональных компьютерах необходимо соблюдать общую инструкцию по технике безопасности при проведении лабораторных работ на кафедре ПУ. Инструктаж по технике безопасности проводится перед началом лабораторных занятий, о чем делается запись в журнале. Работу следует проводить на своем рабочем месте, которое закрепляется за каждым студентом на первом занятии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕКЛЕ

Цель работы - изучение поляризационно - оптического метода нахождения величины напряжений в контролируемом образце и определение категории стекла по двойному лучепреломлению.

Поляризационно - оптический метод применяют при аттестации оптического бесцветного или цветного стекла для измерения в образцах или заготовках величины двойного лучепреломления.

Сущность его основана на использовании свойств поляризованного света. Для реализации метода в соответствии с ГОСТом 3519 - 69 используют обычный поляриметр, состоящий из расположенных последовательно источника света, поляризатора, компенсатора и поворачивающихся вокруг оптической оси анализатора.

Свет, проходя от источника через поляризатор, приобретает линейную поляризацию, а затем в анизотропном образце становится эллиптически поляризованным. Такой свет обычно представляют двумя компонентами, которые называются обыкновенным и необыкновенным лучами. Эти лучи (вследствие различия в показателях преломления) распространяются в образце с разной скоростью, что приводит к возникновению между ними разности хода δ . Используя компенсационную пластинку, создающую между лучами дополнительную разность хода $\lambda/4$, на выходе из неё получают линейно - поляризованный свет. С помощью анализатора, вращая его вокруг оптической оси прибора, определяют угол поворота плоскости поляризации.

Основной причиной разности хода являются термоупругие напряжения, образующиеся на заключительных этапах производства стекла. Эти напряжения приводят к появлению анизотропии материала и изменению состояния поляризованного света, поэтому данный метод широко используют для анализа напряженного состояния заготовок стекла, различных изделий или моделей конструкций при решении специальных задач в теории упругости. При этом по вычисленной величине δ определяют значение разности главных нормальных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$.

Напомним, что главными нормальными напряжениями σ_1 и σ_2 называют соответственно наибольшее и наименьшее напряжения, действующие по взаимно перпендикулярным направлениям элементарной площадки.

Исследованиями установлено, что если в образце имеет место напряженное состояние в пределах упругости материала (выполняется закон Гука), то возникающая анизотропия, характеризуемая разностью хода δ , определяется выражением:

$$\delta = B l \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \text{ [нм]}, \quad (1)$$

где B - коэффициент оптической активности, характеризующий чувствительность материала к механическим напряжениям; l - размер испытуемого образца в направлении распространения поляризованного света.

где B - коэффициент оптической активности, характеризующий чувствительность материала к механическим напряжениям; l - размер испытуемого образца в направлении распространения поляризованного света.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \text{[Па]}. \quad (2)$$

Известно, что остаточные напряжения, деформируя поверхности, влияют на точность формообразования, изменяют оптические характеристики и вызывают двоение изображения.

Конструкция прибора ПКС - 125.

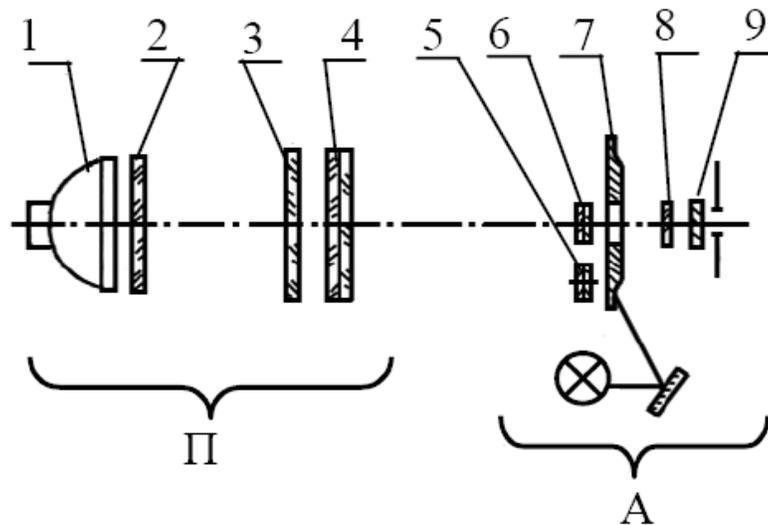


Рис. 1. Полярископ - поляриметр ПКС – 125

Полярископ - поляриметр ПКС – 125 (рис.1) используют для интегральной оценки разности хода δ , обусловленной наличием в стекле остаточных напряжений. Прибор состоит из двух блоков: поляризатора - П с источником света 1, теплофильтром 2, матовым стеклом 3, поляроидом 4; анализатора - А, состоящего из поляроида 8, светофильтра 9, выделяющего область спектра 540 [нм], пластин (компенсатора) 5 или 6, создающих разность хода, соответственно, $\lambda/4$ и λ . При введении пластинки λ разность хода δ определяют по окрашенности интерференционной картины, а при введении пластинки $\lambda/4$ по углу γ поворота анализатора, соответствующего полному гашению света. Угол γ отсчитывают по шкале лимба

Содержание работы

1. Изучить устройство полярископа - поляриметра ПКС-125.
2. Определить разность хода на единицу длины δ/l между обыкновенным и необыкновенным лучами и установить категорию оптического стекла, характеризующую по ГОСТ 3514-76 величиной двойного лучепреломления.
3. Определить величину остаточных напряжений в стекле.

- 5 -

Методические указания и порядок выполнения работы

1. Включить осветитель на передней панели прибора (см. рис1).
2. Вращая анализатор за кольцо с накаткой, находящееся на окуляре, получить максимальное потемнение поля зрения (скрещенное положение поляризатора и анализатора, компенсатор в положении ноль).
3. Поместить на столик прибора испытуемый образец так, чтобы путь света в нем, при нормальном падении на входную грань, был максимальным.
4. Определить разность хода δ в испытуемом образце стекла. Для этого в блоке анализатора установить пластинку $\lambda/4$ и выставить лимб анализатора в нулевое положение. Поместив на столик прибора испытуемый образец в поле зрения окуляра, наблюдают интерференционную картину, вид которой зависит от разности хода δ , величины и распределения напряжений, а именно:

- при разности хода более 540 [нм] в поле зрения виден ряд цветных и две нейтральные (черная и серая) полосы;
- при разности хода 540-100 [нм] наблюдается окрашенность поля зрения и две темные полосы;
- при разности хода менее 100 [нм] в середине и по краям образца виден серый фон, разделенный двумя темными полосами.

Величину δ определяют следующим образом: при $\delta > 540$ [нм], в поле зрения вводят светофильтр, выделяющий область спектра с длиной волны 540 [нм], и устанавливают порядок интерференции, т.е. подсчитывают число N темных полос между нейтральной полосой и серединой образца. Поворачивая анализатор, добиваются максимального потемнения в середине образца. Сняв отсчет величины угла поворота γ анализатора, рассчитывают разность хода δ на всю длину и δ/l - на единицу длины пути (что соответствует двойному лучепреломлению):

$$[\text{нм/см}] \quad (3)$$

При $\delta \leq 540$ [нм] ($N=0$) разность хода можно измерять как в моно-хроматическом, так и в белом свете. В последнем случае для определения δ , поворачивая анализатор, совмещают полосы в середине образца. Иногда для повышения точности отсчета угла поворота в поле зрения вводят зеленый светофильтр. По шкале лимба определяют величину угла γ .

5. По величине найденной разности хода на единицу длины δ/l (с учетом коэффициента оптической активности стекла данной марки) установить категорию стекла по двойному лучепреломлению в соответствии с ГОСТом 3514-76 (табл.1).

Таблица 1

Категория	Двойное лучепреломление в нм на 1 см (δ/l), не более, в стеклах с оптическим коэффициентом напряжения 10^{-12} [Па] ⁻¹		
	В до 2,0	В от 2,0 до 2,8	В свыше 2,8
1	до 1,5	до 2,0	до 3
2	4	0	8
3	0	4	13
4	0	5	20
5	5	0	65

6. По найденной разности хода δ определить величину напряжений $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma$ в образцах стекла.

7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ образца	Коэфф. опт.активности В, 10^{-12} [Па] ⁻¹	Размер l образца, [см].	γ , град.	Разность хода δ/l [нм/см].	Категория по двойному лучепреломлению	$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$, [Па]

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Краткую теоретическую часть и основные формулы для расчета δ , $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma$.
2. Оптическую схему прибора ПКС-125.
3. Таблицу экспериментальных и расчетных данных.
4. Выводы по экспериментальным и расчетным данным.

Контрольные вопросы

1. Сущность поляризационно-оптического метода исследования напряженного состояния оптических материалов.
2. Причины, вызывающие двойное лучепреломление в стекле.
3. Влияние напряжений на оптические характеристики деталей и качество оптической системы в целом.
4. Полярископ-поляриметр ПКС-125. Его устройство, назначение, основные узлы и их элементы.

Литература

1. Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. - Л.: Машиностроение. - 1974г.
2. Кривовяз Л.М., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. - Л.: Машиностроение, 1974г. - 7 -
3. Зубаков В.Г., Семибратов М.Н., Штандель С.К. Технология оптических деталей - М.: Машиностроение, 1985г.
4. Кузнецов С.М., Окатов М.А. Справочник технолога - оптика - Л.: Машиностроение, Ленинградское отд., 1983г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Цель работы - изучение интерференционных методов контроля формы полированных поверхностей и практическое измерение формы поверхности с помощью пробных стекол и на интерферометре ИТ-70.

Основные положения

Контроль формы точных полированных поверхностей основан на использовании явления интерференции света, возникающей в воздушном зазоре между контролируемой поверхностью и эталонной, радиус кривизны которой соответствует заданному чертежом радиусу.

Если контролируемую поверхность детали совместить с измерительной поверхностью эталона, то при несоответствии их формы образуется воздушный промежуток, который можно рассматривать как пластинку толщиной h с показателем преломления $n=1$. Разность хода δ лучей света с длиной волны λ , падающих на пластинку под углом α и отраженных поверхностями, ограничивающими зазор, равна

$\delta = 2h \cos \alpha - \frac{\lambda}{2}$. При падении света по нормали к поверхности $\delta = 2h + \frac{\lambda}{2}$. Если разность

хода δ кратна четному числу $\frac{\lambda}{2}$, будет иметь место усиление света, если нечетному -

ослабление. В зазоре, толщина h которого неодинакова, разность хода лучей различна. При широком источнике света можно наблюдать чередующиеся интерференционные кольца, локализованные на поверхности воздушного зазора. Кольца располагаются там, где величина зазора одинакова, поэтому их называют кольцами равной толщины. При наблюдении в белом свете видны цветные кольца, в монохроматическом - темные и светлые. При пере-ходе от кольца к кольцу одинакового цвета, толщина воздушного

промежутка меняется на $\frac{\lambda}{2}$. Число колец любого (но одного цвета) характеризует

разность стрелок прогиба поверхности детали и эталона. Отступление радиуса кривизны контролируемой поверхности от заданного (эталона) называют **общей ошибкой** и обозначают знаком N . Форма интерференционных колец, в сечении параллельном их направлению, воспроизводит профиль воздушного зазора между поверхностями детали и эталона. Если кривизна поверхности детали меняется плавно, кольца имеют вид параллельных окружностей (или дуг). Типичны следующие виды общих ошибок формы поверхностей (рис.4):

- « бугор » - условное название ошибки, при которой толщина зазора на краю больше, чем в центре (рис.4а);

- « яма » - условное название ошибки, при которой толщина зазора в центре больше, чем с краю (рис.4б).

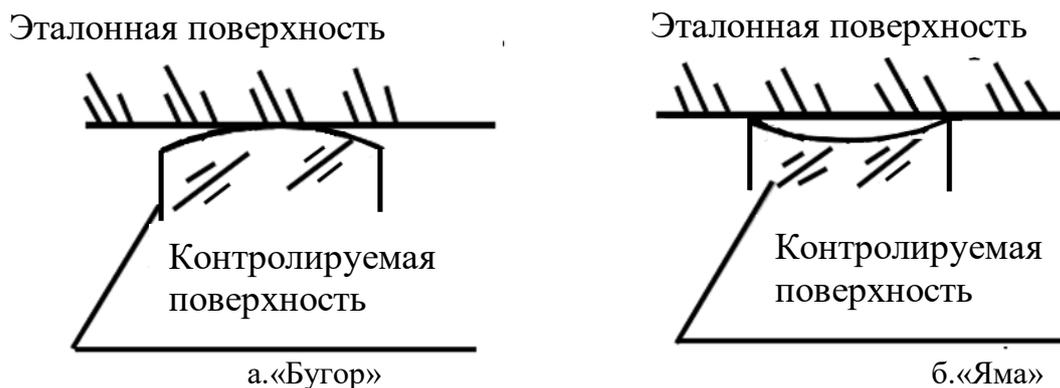


Рис.4. Типы общей ошибки

$$N = \Delta H / H = 0,5$$

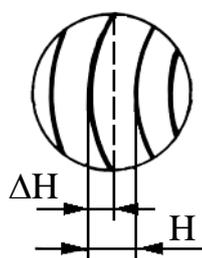


Рис.5. Определение величины общей ошибки

Если общая ошибка мала ($N < 1$), то вместо колец интерференции появляется равномерно окрашенная картина. По ее цвету судят о величине ошибки: красный цвет - $N \cong 1/2$, синий - $N \cong 1/4$, желтый - $N \cong 1/8$. Для более точного определения величины таких ошибок, между контролируемой и измерительной поверхностями создают воздушный клин. Тогда интерференционная картина приобретает вид полос. О величине N общей ошибки судят по отношению стрелки прогиба ΔH полосы к расстоянию H между соседними полосами одного цвета (рис.5) - красными при наблюдении в белом свете, темными - в монохроматическом.

Нерегулярность формы контролируемой поверхности в различных зонах называют **местной ошибкой**. Типичные ошибки: «местная яма» (рис.6а), «местный бугор» (рис.6б), «приподнятый край» (рис.6в), «завал» (рис.6г), «астигматизм» (рис.7). Астигматизм - условное название ошибки, при которой кривизна контролируемой поверхности неодинакова по абсолютной величине в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Вели-

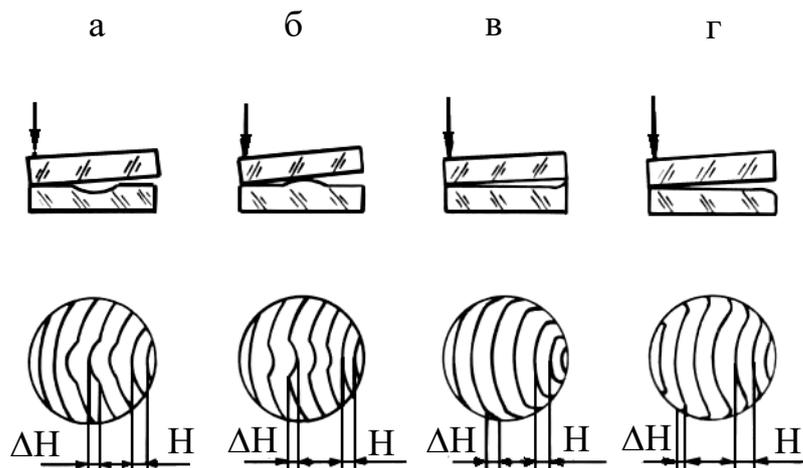


Рис.6. Типы местных ошибок

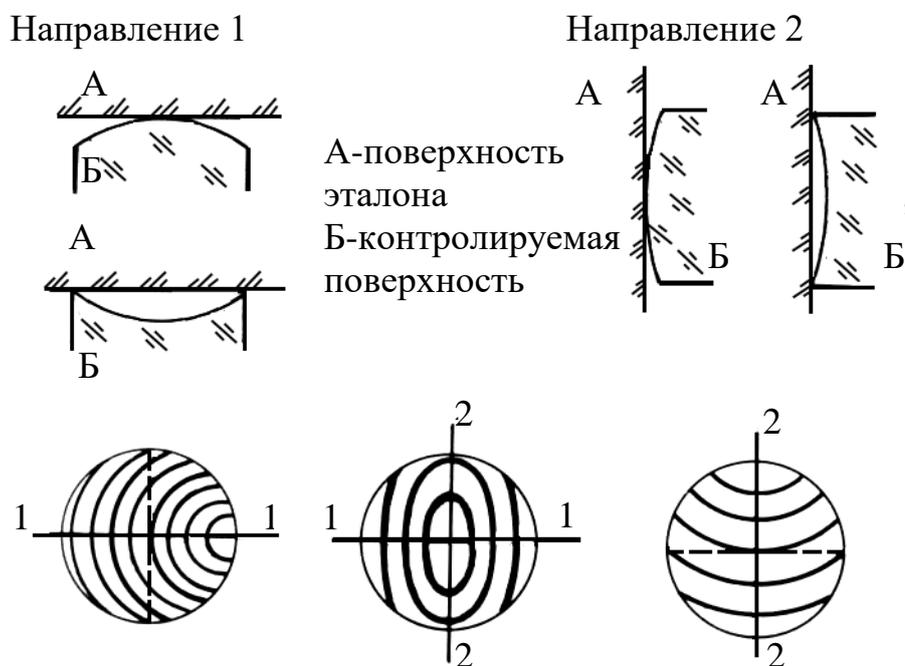


Рис.7. Определение наличия ошибки «Астигматизм»

чину астигматизма оценивают сравнением с картинками контрольной таблицы.

На практике часто наблюдается сочетание ошибок краевой и центральной зон («завал» и «местная яма», «приподнятый край» и «местный бугор» и др.). Для получения представления о форме всей поверхности и суждении о наличии или отсутствия на ней местных ошибок, размер контролируемой детали должен быть меньше эталона. Если деталь больше эталона, величина стрелки прогиба N_a на диаметре d_a детали

$$N_d = \left(\frac{d_d}{d_s} \right)^2 N_s \quad (10)$$

где d_s - диаметр эталона; N_s - стрелка прогиба (в интерференционных полосах) контролируемой поверхности на диаметре d_s эталона.

Эталоны применяются в виде так называемых пробных стекол - для непосредственного наложения их измерительной поверхности на контролируемую поверхность детали, и установленным в приборы (интерферометры) - для бесконтактных измерений.

Пробные стекла. Пробные стекла - эталоны плоской и сферической поверхностей заданного радиуса кривизны имеют диаметр до 130[мм]. Радиусы кривизны измерительной поверхности сферических пробных стекол нормализованы. Для каждого значения радиуса, в том числе и $R=\infty$, в условиях серийного производства, изготавливается 3 пары пробных стекол:

РПС - рабочие пробные стекла для контроля поверхностей деталей.

КПС - контрольные пробные стекла для проверки поверхностей рабочих пробных стекол.

ОПС - основные пробные стекла для проверки контрольных стекол.

В условиях мелко серийного производства допускают наличие только РПС и ОПС.

Таблица 1

Класс точности пробных стекол	Сферические стекла с номинальными значениями радиусов R , [мм]						Плоские стекла $R=\infty$
	от 0,5 до 2	св. 2 до 10	св. 10 до 37,5	св. 37,5 до 250	св. 250 до 1000	св. 1000 до 40000	Допустимые отклонения от плоскости
	Допустимые отклонения $R (\pm)$						
	[мкм]			% от номинальной величины R			
1.	0,5	1,0	2,0	0,01	0,02	$\frac{0,02\% R}{1000}$	0,05
2.	1,0	3,0	5,0	0,03	0,05	$\frac{0,05\% R}{1000}$	0,07
3.	2,0	10,0	15,0	0,10	0,15	$\frac{0,15\% R}{1000}$	0,1

Сферические пробные стекла всех радиусов кривизны изготавливают парами - выпуклое и вогнутое. По точности формы измерительной поверхности пробные стекла разделяются на три класса. Допускаемые отклонения радиусов кривизны измерительных поверхностей сферических ОПС от номинальных значений R и от плоскостности плоских ОПС представлены в табл.1.

Интерферометр для контроля плоских поверхностей

Интерферометры для технологического контроля плоских поверхностей могут быть с зеркальным или линзовым объективом. Первые, в соответствии с размером зеркала, позволяют контролировать детали или блоки диаметром до 350 - 400 [мм], вторые, до 100 - 120 [мм]. В настоящей работе используется интерферометр ИТ-70 с линзовым объективом.

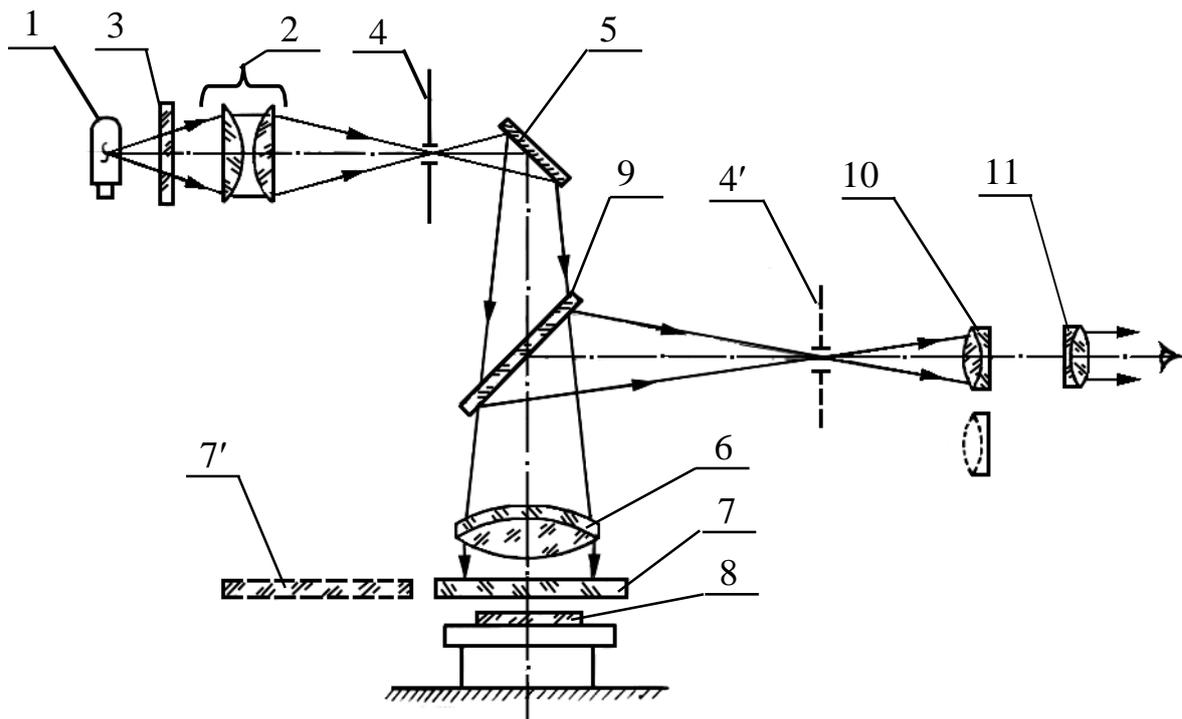


Рис.8. Оптическая схема ИТ-70

Оптическая схема прибора приведена на рис.8. Здесь светящееся тело 1 спектральной лампы СМР-1 конденсором 2 проектируется в плоскость отверстия диафрагмы 4. В ход лучей вводится светофильтр 3. Свет, отраженный зеркалом 5, попадает в объектив 6 коллиматора. На выходе из него параллельный пучок падает на эталон 7, проходит через него и попадает на контролируемую поверхность детали 8. Пучки света, отраженные поверхностями детали и эталона накладываются друг на друга и интерферируют. Картина интерференции при помощи светоделительной пластинки 9 проектируется в фокальную плоскость телескопической лупы, состоящей из объектива 10 и окуляра 11. Прибор может быть использован для наблюдения двух - и многолучевой картин интерференции. В последнем случае вместо эталона 7 вводят эталон 7' со светоделительным покрытием. При использовании двухлучевой интерференции отступление от плоскости может быть измерено с точностью порядка 0,1 полосы, при многолучевой - до 0,05 полосы. На интерферометре можно контролировать плоскопараллельность тонких (до 8 [мм]) пластин путем наблюдения в них полос равной толщины.

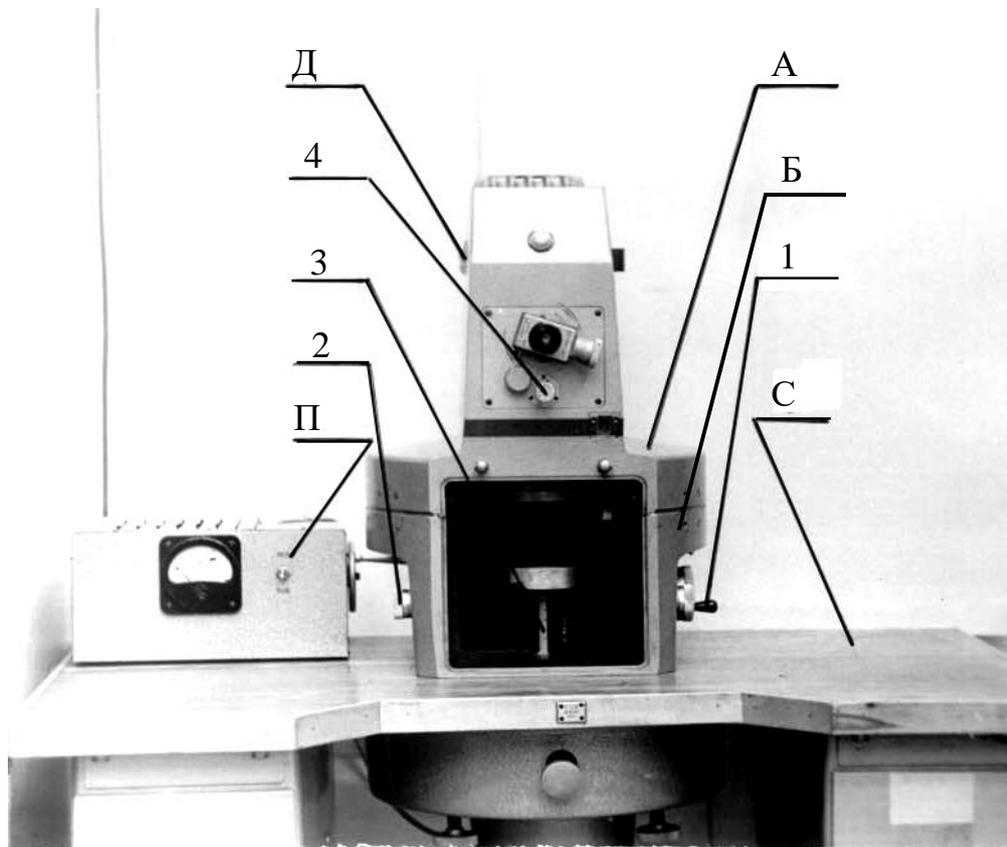


Рис.9. Общий вид ИТ-70

Интерферометр (рис.9) состоит из верхней А и нижней Б частей, стола С и пульта П зажигания. В верхнюю часть входит осветитель и все оптические детали схемы, кроме эталона. Лампу осветителя подключают через пульт зажигания в сеть переменного тока напряжением 220 вольт. Диафрагмы меняют поворотом диска Д. В нижнюю часть прибора входит узел эталонных пластин и предметный столик с рукоятками управления. Подъем и опускание столика производят рукояткой 1, а его наклон в двух взаимно-перпендикулярных направлениях - рукоятками 2. Величина подъема столика может быть замерена по шкале 3. Все рукоятки управления расположены на внешнем корпусе прибора.

Содержание работы

1. Используя эталоны с $R = \infty$ и $R = -80,17$ [мм] проконтролировать форму трех плоских и сферических деталей. Определить вид («бугор», «яма») и величину общей ошибки N . Определить вид («местный бугор», «местная яма») и величину местных ошибок ΔN .

2. Эти же детали проконтролировать на интерферометре ИТ-70. Определить общую N и местные ΔN ошибки.

3. Сравнить результаты измерений и оценить точность контроля.

Методические указания и порядок выполнения работы

Контроль пробными стеклами

1. Тщательно промыть спиртом и протереть салфеткой измерительную поверхность эталона и контролируемую поверхность детали.

2. Беличьей кисточкой смахнуть с них пыль и осторожно опустить пробное стекло измерительной поверхностью на контролируемую поверхность (или наоборот - в зависимости от соотношения размеров эталон - деталь и толщины последней). При этом пробное стекло должно скользить по детали (или наоборот - деталь по пробному стеклу) на тонкой воздушной подушке, находящейся в зазоре между совмещенными поверхностями. При малом усилии прижатия эталона к детали (или наоборот детали к эталону) должна появиться интерференционная картина, которая при несоответствии формы поверхности детали и эталона будет иметь вид колец или равно-мерную окраску. Отсутствие свободного скольжения эталона по детали (или детали по эталону) указывает на некачественную чистку измерительной и контролируемой поверхностей. **Категорически запрещается притирать их друг к другу!** Интерференционная картина будет искаженной, а поверхности повреждены (поцарапаны).

3. По числу N колец интерференции одного цвета (красных - при наблюдении в белом свете и темных - в монохроматическом) определить величину общей ошибки. Вид ошибки устанавливают по направлению перемещения колец при нажатии на середину пробного стекла (или детали). При ошибке «яма» кольца интерференции перемещаются от края к центру, при ошибке «бугор» - наоборот. Зарисовать интерференционную картину и занести её в таблицу.

4. Создав воздушный клин нажимом на край эталона (или детали) определить общую ошибку N по отношению стрелки прогиба полосы к расстоянию между соседними полосами одного цвета. Вид ошибки определяется по направлению искривления полос относительно точки прижима. При ошибке «бугор» полосы расположены вогнутостью к точке прижима, при ошибке «яма» - выпуклостью. При нерегулярности формы полосы установить вид местной ошибки ΔN . Найти величину этой ошибки. Зарисовать картину интерференции и занести её в таблицу 1.

Контроль на интерферометре

1. Тумблером на корпусе пульта зажигания включить лампу освещения.

2. Включить освещение внутреннего пространства интерферометра тумблером, расположенным с правой стороны корпуса прибора.

3. Установить контролируемую деталь на столик прибора и поднять его вращением рукоятки 1 (см.рис.9) до получения зазора между эталоном и деталью равного примерно 1[мм].

4. Повернуть рукоятку 4 в правое положение, при котором объектив телескопической лупы выводится из хода лучей. С помощью рукояток 2, осуществляющих наклон столика, совместить автоколлимационное изображение диафрагмы от измерительной поверхности эталона и контролируемой поверхности детали.

5. Включить внутреннее освещение прибора, поворотом рукоятки 4 в исходное положение, ввести в ход лучей телескопическую лупу.

6. Наблюдая в окуляр и регулируя наклон столика с деталью рукоятками 2, установить желаемый характер интерференционной картины (полосы или кольца), изменить ширину и направление полос. Поворотом диска Д с набором диафрагм отрегулировать яркость и контрастность интерференционной картины.

7. Найти величину общей ошибки двумя способами - по числу интерференционных колец и по отношению стрелки прогиба полосы к расстоянию между соседними полосами. Установить вид общей ошибки. Определить вид и величину местной ошибки. Результаты измерений общей и местной ошибок и наблюдаемые интерференционные картины, занести в таблицу 1.

Таблица 1

Номер детали	Картина интерференции, характеризующая отступление поверхности от эталона		Вид и величина общей ошибки		Вид и величина местной ошибки	
	в кольцах	в полосах	N	Вид	ΔN	Вид

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Краткую теоретическую часть.
2. Оптическую схему интерферометра с ходом лучей.
3. Таблицу с результатами измерений.

Выводы по результатам измерений с объяснением полученных интерференционных картин.

Контрольные вопросы

1. Как определить вид и величину ошибки контролируемой поверхности (общая, местная) при наблюдении картин интерференции в кольцах и полосах?
2. Типы и назначение пробных стекол, применяемых в серийном производстве оптических деталей.
3. Классы точности ОПС. Единицы измерения, в которых задают до-пускаемые отклонения R сферических ОПС и допускаемые отклонения от плоскостности плоских ОПС.
4. Точность контроля формы поверхности на интерферометре и пробными стеклами.
5. Почему повышается точность измерений при использовании многолучевой интерференции?
6. Как рассчитать ошибку формы поверхности детали, если её размер больше эталона?

Литература

1. Кузнецов С.М., Окатов М.А. Справочник технолога -оптика - Л. Машиностроение, Ленинградское отд., 1983г.
2. Семибратов М.Н. Технология оптических деталей. - М. Машиностроение, 1978г.
3. Краткая теоретическая часть методических указаний стр.8.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

КОНТРОЛЬ МАЛОЙ КЛИНОВИДНОСТИ ПЛАСТИН НА ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ЧАПСКОГО

Цель работы - изучение интерференционного метода контроля малой клиновидности плоскопараллельных пластин.

Клиновидность плоскопараллельных пластин вызывает двоение изображения и поперечный хроматизм. Величина допустимой погрешности определяется назначением детали и её положением в оптической системе.

Плоскопараллельность полированных пластин и величину малых углов клиньев определяют на интерферометре Чапского. Действие прибора основано на принципе интерференции световых лучей, отраженных рабочими поверхностями детали. Если отраженный свет широкого источника собирается линзой, то в её фокальной плоскости наблюдается интерференционная картина в виде концентрических колец. Эти полосы называют полосами равного наклона в отличие от полос равной толщины, наблюдаемых при интерференции в клине. Вид и локализация полос интерференции определяются величиной угла клина и условиями освещения.

Рассмотрим возникновение полос равного наклона и определим величину разности хода лучей, отраженных под некоторым углом от плоскопараллельной пластины (рис.10).

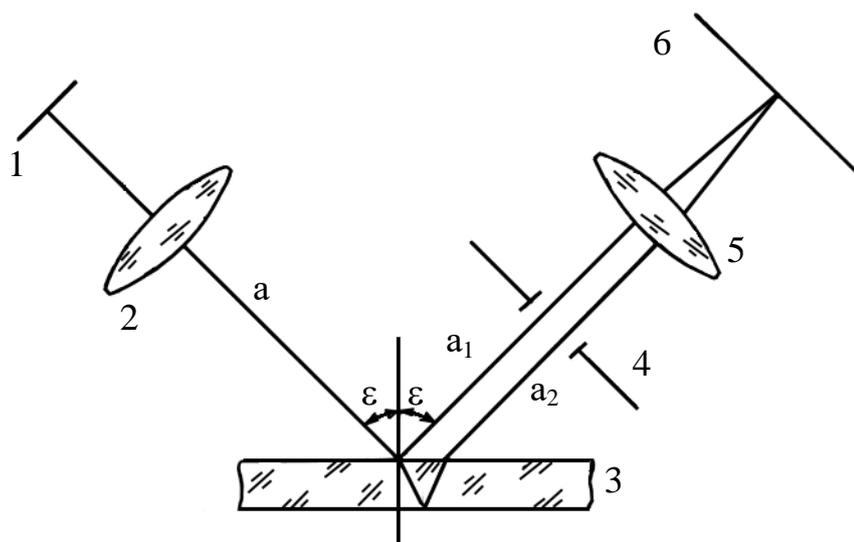


Рис.10. Способ наблюдения полос равного наклона

В плоскости изображения широкого источника света 1, помещенного в фокусе объектива коллиматора 2, наблюдают полосы равного наклона. Изображение получают в фокальной плоскости 6 линзы 5.

Для любого луча а, падающего на пластинку 3 под углом ε, часть света отражается первой поверхностью (луч а₁), а часть проникает в глубь стекла, и отразится от второй поверхности. Выйдя из пластинки, луч а₂ направится параллельно лучу а₁, отраженному первой поверхностью.

Пройдя объектив 5, лучи а₁ и а₂ интерферируют в фокальной плоскости 6. В зависимости от разности хода этих лучей (определяемой толщиной *d* пластинки, показателем преломления *n* её материала и углом ε падения света) будет наблюдаться интерференционный максимум или минимум. Разность хода δ этих лучей (рис.11):

$$\delta = n(AB + BC) - CD - \frac{\lambda}{2} = 2n \cdot AB - CD - \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \epsilon} - \frac{\lambda}{2} \quad (11)$$

если $\delta = 2k \frac{\lambda}{2}$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, то наблюдают интерференционный максимум.

При $\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ - интерференционный минимум.

Из формулы (11) видно, что для лучей падающих на пластинку под углом, разность хода зависит от угла падения. Поскольку под одним и тем же углом на пластинку падает пучок лучей в виде конической поверхности, то в фокальной плоскости объектива будет наблюдаться светлое или темное кольцо (при $\delta = 2k \frac{\lambda}{2}$ - светлое, при $\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ - темное).

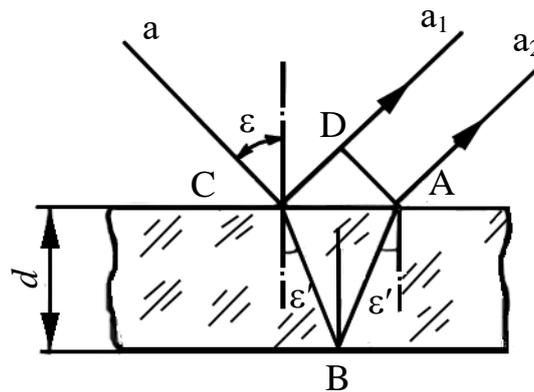


Рис.11. Геометрическое определение разности хода δ

При использовании широкого источника угол падения света на пластину меняется в больших пределах, поэтому в фокальной плоскости объектива 5 наблюдается ряд чередующихся светлых и темных колец концентрической формы. Если поверхности пластины образуют между собой малый угол θ , то изображения источника 1 в фокальной плоскости 6 разойдутся на расстояние $l = 2\theta n f$, где f - фокусное расстояние линзы 5. При этом в фокальной плоскости изображения некогерентных точек источника 1 будут накладываться друг на друга. Если $l \geq r$, (r - дифракционный размер точки источника), то интерференция наблюдаться не будет. Дифракционный радиус точки определяется по формуле:

$$r = 1,22 \frac{\lambda f}{D} \quad (12)$$

где D - диаметр диафрагмы 4 (см.рис.10)

Критический угол клина θ_0 , при котором интерференционная картина размывается, равен:

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{2nD} \quad (13)$$

При $\theta < \frac{\theta_0}{2}$ в плоскости 6 будут наблюдаться контрастные интерференционные полосы равного наклона.

Для контроля параллельности пластин интерференционную картину, получаемую в фокальной плоскости 6 линзы 5, рассматривают с помощью окуляра, который вместе с линзой 5 (рис.10) образует зрительную трубу. Для удобства наблюдения и отсчета половина поля зрения окуляра перекрыта, поэтому наблюдают картину полуколец.

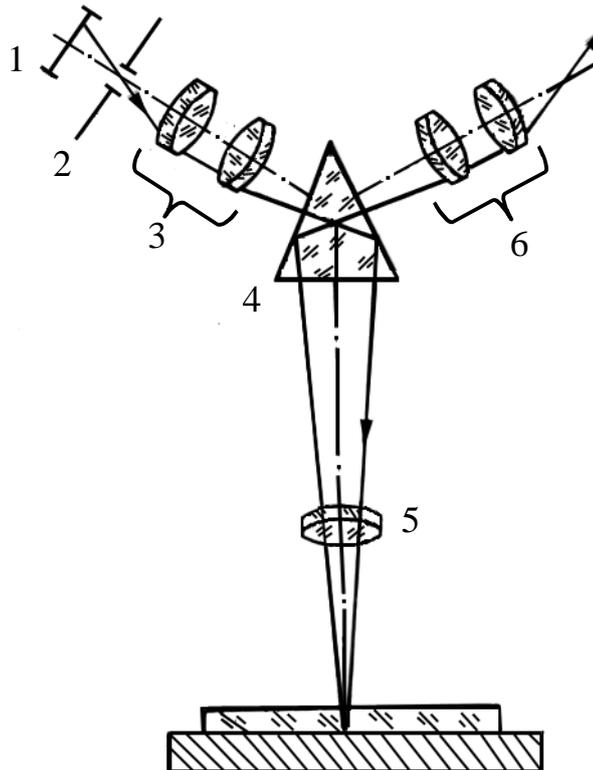


Рис.12. Оптическая схема интерферометра Чапского

Если пластина 3 плоскопараллельна, то при её перемещении под объективом 5 никаких изменений в поле зрения окуляра наблюдаться не будет. Если же пластина клиновидна, то разность хода для каждого луча будет изменяться. Вследствие этого одновременно с перемещением пластинки будет наблюдаться смещение колец интерференции. Кольца либо появляются в центре и перемещаются к периферии, либо наоборот – перемещаются к центру и исчезают. Первый случай соответствует перемещению пластины в сторону увеличения её толщины, второй - в сторону уменьшения.

Появление или исчезновение кольца соответствует изменению толщины пластины на величину $\delta d = \frac{\lambda}{2n}$.

Наблюдая перемещение колец относительно какой-либо точки поля зрения окуляра, можно определить изменение толщины пластины, пере-двинув её по всей длине под объективом 5.

Если при перемещении пластины на длину L появилось или исчезло N колец, то величину клиновидности определяют по формуле:

$$\operatorname{tg} \theta'' = \frac{N\lambda}{2nL} \quad (14)$$

где λ - длина световой волны, для которой производятся измерения ($\lambda = 0,583 \cdot 10^{-6}$ [м]).

Формула (14) справедлива для случая, когда пластинку передвигают перпендикулярно ребру клина.

Описание конструкции прибора

Используемый в данной работе интерферометр Чапского (рис.12) состоит из широкого источника света 1 (неоновой лампы со светящимся диском), щелевой диафрагмы 2 переменной величины, конденсора 3, разделительной призмы 4 с углами 60° , объектива 5, окуляра 6.

Луч света, пройдя конденсор, отражается призмой и, пройдя через объектив, падает на испытуемую пластинку, отражается от двух поверхностей, опять проходит объектив, призму и попадает в окуляр.

Интерференционная картина локализуется в фокальной плоскости объектива 5. Наблюдают интерференционную картину с помощью окуляра 6. Прибор применяют для контроля пластин с величиной клина не более $12''$ при толщине пластины $10[\text{мм}]$.

Содержание работы

1. Получить в поле зрения окуляра интерферометра Чапского резкое изображение интерференционных полос равного наклона от клиновидной пластинки.
2. Измерить клиновидность нескольких пластин.

Методические указания и порядок выполнения работы

1. Включить источник света.
2. Поместить испытательную пластинку на столик интерферометра.
3. Получить резкое изображение штриховой сетки окуляра.
4. Вращая кольцо объектива, добиться резкого изображения интерференционной картины в поле зрения окуляра.

5. Вращая столик, установить пластинку в такое положение, чтобы при перемещении её по одним направляющим картина оставалась без изменения (это соответствует перемещению пластины параллельно ребру клина), а при перемещении по направляющим, перпендикулярным первым, наблюдалось смещение интерференционных колец (это соответствует перемещению пластины перпендикулярно ребру клина).

6. Перемещая пластину по направляющим, перпендикулярным ребру клина, сосчитать число колец (N), переместившихся в поле зрения окуляра относительно штриха сетки, снять по шкале, нанесенной на направляющих, начальный и конечный отсчеты, соответствующие перемещению пластины на её длину L . Результаты измерений для всех контролируемых пластин занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ образца	Марка стекла	n	N	$L(M)$	$\text{tg}\theta = \frac{N\lambda}{2nL}$	θ

7. Для одной из пластинок с максимальным N повторить несколько раз измерения, сняв по шкале отсчеты, соответствующие перемещению пластины на каждое кольцо. Данные измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

Перемещение пластины [мм]	Порядковый номер кольца	Разность оптической толщины пластины [мкм]

Исчезновению или появлению одного кольца соответствует изменение толщины пластины на $\frac{0,29}{n}[\text{мкм}]$, где n - показатель преломления материала пластинки.

8. На основании данных таблицы 2 построить графическую зависимость изменения толщины пластины в данном направлении от перемещения $d = \varphi(L)$. Оценить погрешность измерения клиновидности. (При построении графика изменения толщины пластины от перемещения, пользоваться методом наименьших квадратов).

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Краткую теоретическую часть.
2. Оптическую схему интерферометра Чапского.
3. Расчетную формулу для определения клиновидности (формулу 4).
4. Таблицы 1 и 2 результатов измерения клиновидности.
5. График изменения толщины пластины как функцию перемещения в направлении, перпендикулярном ребру клина.
6. Анализ погрешностей и вывод по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Объяснить разницу между интерференционными полосами равного наклона и равной толщины.
2. Почему при малой клиновидности контролируемой пластины наблюдаются полосы равного наклона?
3. В каком интервале клиновидности пластины могут производиться измерения с помощью интерферометра Чапского?
4. Назначение элементов оптической схемы интерферометра Чапского.
5. Для чего необходим контроль клиновидности плоскопараллельных пластин?
6. Какую минимальную клиновидность можно обнаружить с помощью интерферометра Чапского?
7. Как расширить диапазон измерений?
8. Какими причинами ограничивается верхняя граница измерений?

Литература

- Захарьевский А.Н. Интерферометры. Оборонгиз, 1952г.
- .Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. - Л.:Машиностроение, 1974г.
- Федотов Г.И., Новицкий Л.А., Гоменюк А.С.и др.; под ред. Новицкого Л.А. - М. Лабораторные оптические приборы. Учебное пособие для приборостроительных и машиностроительных вузов. - М. Машиностроение , 1979г.
- Краткая теоретическая часть методических указаний стр.8

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИЗМ

Цель работы - изучение автоколлимационного метода измерения углов призм и его практическое освоение.

Автоколлимационный метод измерения углов состоит в следующем. Формируется световой пучок с малой расходимостью (теоретически параллельный). Этот пучок направляется на контролируемый объект, например, зеркало, пластину или призму. После отражения от объекта пучок изменяет

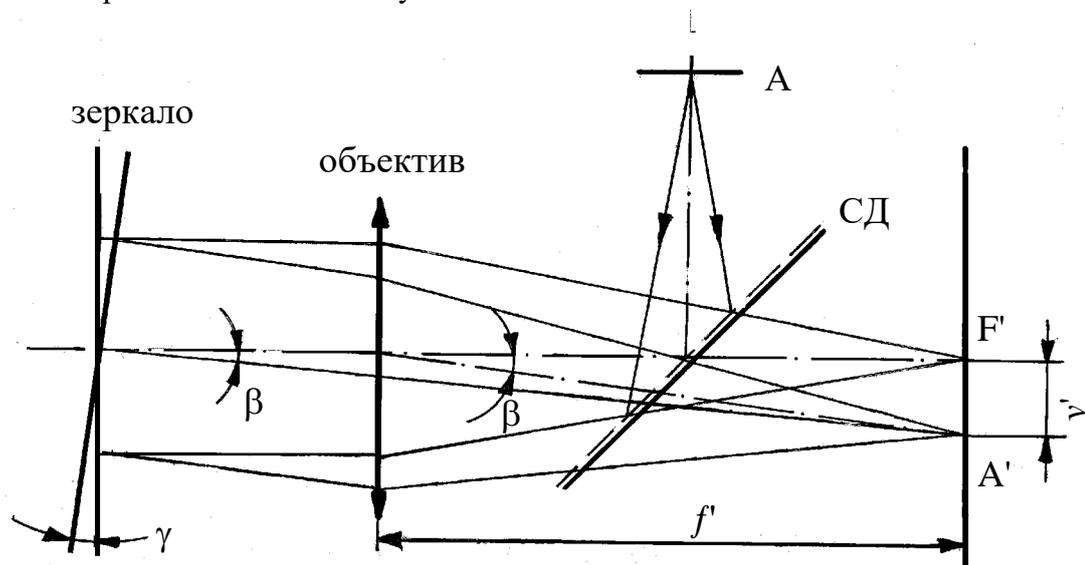


Рис.13. Автоколлимационный метод измерения углов

угловую ориентацию. Угловая ориентация отраженного пучка регистрируется по координатам изображения, полученного от этого пучка. Рассмотрим упрощенную схему автоколлиматора для измерения углов (рис.13). Между объективом и его фокальной плоскостью установлена светоделительная поверхность СД. Тест-объект с центральной точкой А установлен в фокальной плоскости объектива и подсвечивается источником излучения. Лучи от точки А направляются светоделительной поверхностью в сторону объектива и выходят из него параллельным пучком. На некотором удалении от объектива располагается плоское зеркало, угловое положение которого измеряется. Если нормаль к поверхности зеркала совпадает с оптической осью, то отраженные им лучи, пройдя через объектив, образуют изображение А' точки А на оптической оси объектива, т.е. в точке F'. При появлении углового разворота объекта γ зеркало, будучи повернутым на тот же угол, отразит падающие от него лучи под углом 2γ . Таким образом, $\beta = 2\gamma$. Изображение точки А в этом случае сместится с оптической оси на величину y' .

$$\text{Измерив } y', \text{ найдем } \beta = \arctg \frac{y'}{f'} \text{ или для малых углов } \beta = \frac{y'}{f'}.$$

Теперь плоское зеркало с наружной отражающей поверхностью заменим клиновидной пластиной.

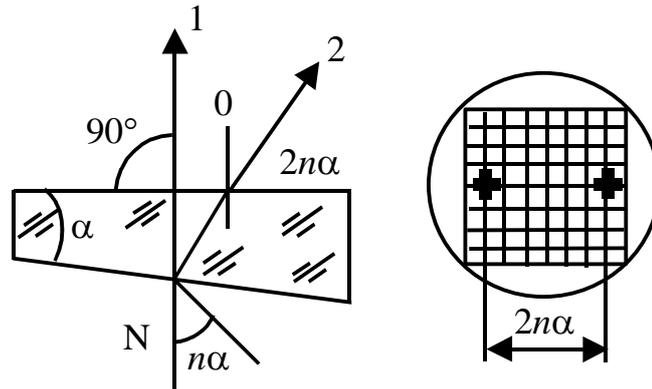


Рис.14. Автоколлимационное изображение марки, образованное отражением пучка от наружной и внутренней поверхностей клина.

Если пластинку с углом клина α поместить перед объективом автоколлиматора, то в поле зрения окуляра будут видны два автоколлимационных изображения (1) и (2) марки, образованные отражением пучка от наружной и внутренней поверхностей (рис.14).

В зависимости от величины угла α клина и показателя преломления n материала детали, блики разойдутся вдоль главного сечения клина на величину $\delta=2n\alpha$.

Величину угла α находят измерением по сетке автоколлиматора расстояния δ между бликами

$$\alpha = \frac{d}{2n} = \frac{H \cdot a}{2n} \quad (15)$$

где H - число квадратов сетки между бликами, a - цена деления сетки. Показатель преломления n материала берется с точностью до второго десятичного знака.

Контроль взаимного расположения рабочих поверхностей призм, разворачивающихся в плоскопараллельную пластинку, не отличается от рассмотренного. При наличии погрешностей в величине углов автоколлимационные блики будут расположены в различных участках сетки. Их расхождение пропорционально величине ошибки изготовления как в главном сечении, так и в направлении, ему перпендикулярном.

Определив погрешности для нескольких положений призмы и решив систему уравнений, связывающих погрешности с клиновидностью развертки, находят абсолютное значение углов и величину пирамидальности призмы. Если призма работает как AP-90⁰, (рис.15.a), то существенна раз-

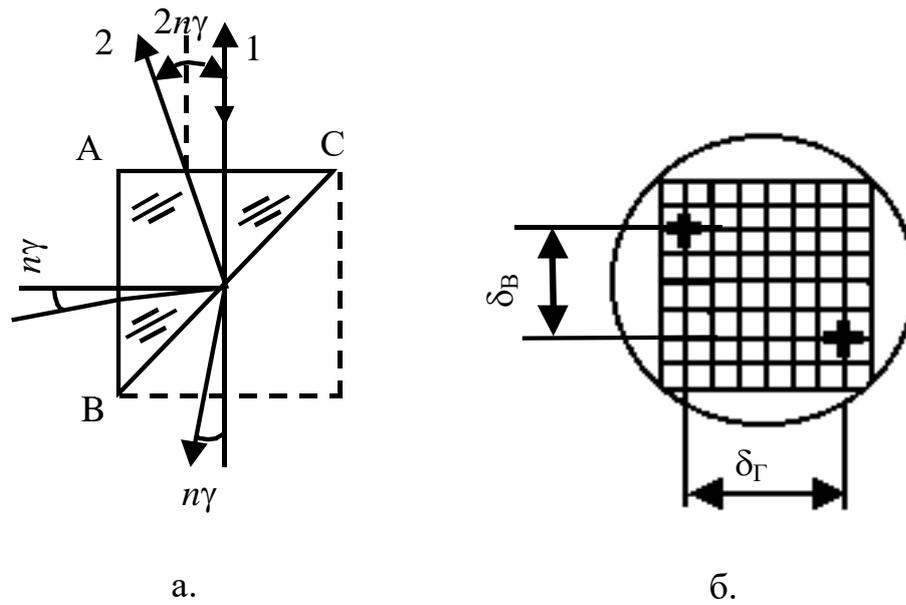
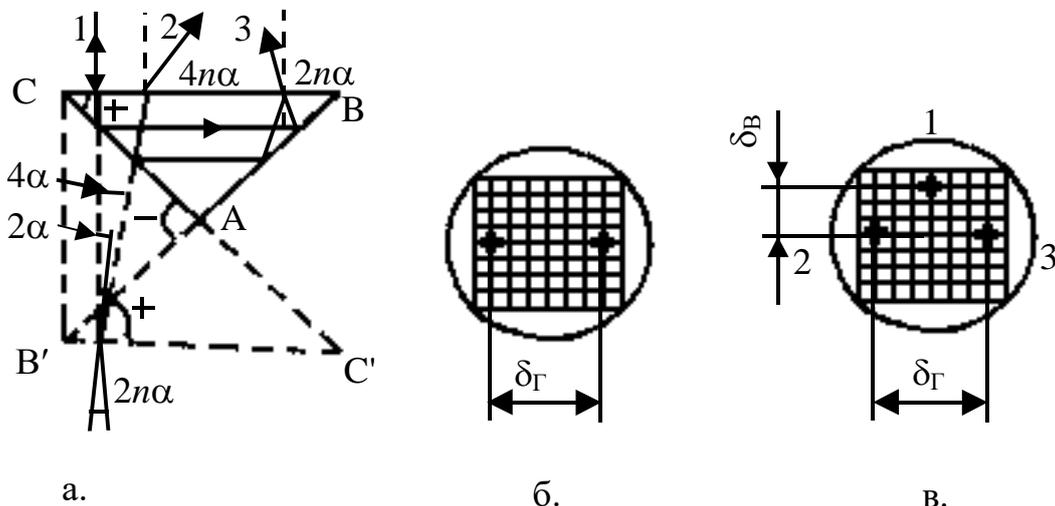


Рис.15.Измерение погрешности изготовления угла 45°
определение пирамидальности

ность в величине углов В и С, обозначаемая $\delta 45^\circ$, т.е. $B - C = \delta 45^\circ$. При наличии ошибок $\delta 45^\circ$ и пирамидальности π в поле зрения окуляра видны два блика (рис.15.б). Измерив расстояние между ними по горизонтали (δ_Γ) и вертикали (δ_B) рассчитывают $\delta 45^\circ$ и пирамидальность π призмы:

Рис.16. Измерение погрешности изготовления угла 90° и определение



пирамидальности

$$\delta 45^\circ = \frac{\delta_\Gamma}{2n}; \pi = \frac{\delta_B}{2n\sqrt{2}} \quad (16)$$

Знак $\delta 45^\circ$ определяют уменьшением рефлекса от задней поверхности, увлажняя дыханием гипотенузную грань. Исчезновение левого блика показывает, что $\delta 45^\circ > 0$, а правого $\delta 45^\circ < 0$.

Погрешность взаимного расположения поверхностей, образующих угол 90° ($\Delta 90^\circ$) контролируют по схеме работы призмы как БР - 180° (рис.16.а). Входной является гипотенузная грань.

Условие плоскопараллельности развертки:

$$C - A + B = 0 \text{ т.к. } A + B + C = 180^\circ, \text{ то } -2A + 180^\circ = 0.$$

Если угол A имеет погрешность, то $-2A + 180^\circ = 2\Delta 90^\circ$, $A=90^\circ - \Delta 90^\circ$. Знак погрешности определяется положением вершины развертки относительно вершины угла 90° .

При контроле угла 90° в поле зрения окуляра в зависимости от яркости источника будут видны два и более бликов. Чаще пользуются двумя бликами (рис.16.б), которые остаются неподвижными в поле зрения при небольших поворотах предметного столика с призмой вокруг вертикальной оси. Погрешность угла 90° определяют:

$$\Delta 90^\circ = \frac{\delta_{\Gamma}}{4n}, \text{ и пирамидальность } \pi = \frac{\delta_{\text{В}}}{4n}.$$

Точку пересечения ребер призмы находят по трем подвижным бликам. Определяют расположение среднего блика (1) относительно крайних (2 и 3) (рис.16.в). Верхнее положение среднего блика показывает, что точка схождения ребер находится над призмой, а нижнее - под ней.

Наиболее наглядно знак погрешности угла 90° может быть определен при использовании поляризованного света. В измерительную схему вводят поляроиды P_1 и P_2 со скрещенными плоскостями поляризации.

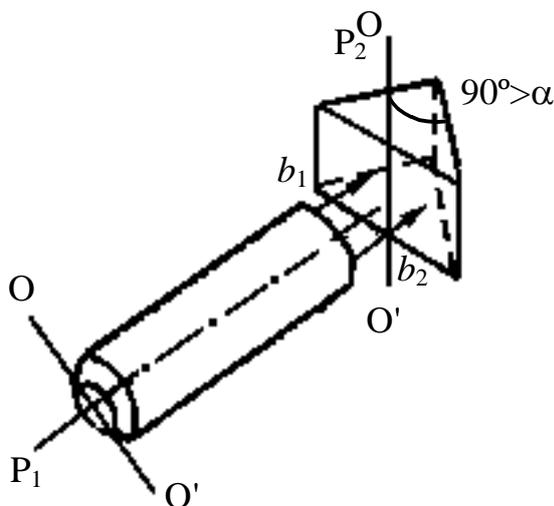


Рис.17. Схема определения знака погрешности угла 90°

Когда плоскость поляризации $O - O'$ составляет с ребром призмы угол $\alpha < 90^\circ$, один из лучей будет погашен. Если плоскость $O - O'$ параллельна или перпендикулярна ребру призмы прямого угла, одновременно гасятся оба луча. На рис.17 луч b_1 исчезает, т.к. выйдя из призмы, он поляризован в плоскости, перпендикулярной плоскости поляроида P_1 . Луч b_2 не исчезает, т.к. плоскость поляризации его после отражения внутри измеряемой призмы параллельна плоскости поляризации поляроида P_1 .

Исчезновение правого блика означает положительный знак погрешности прямого угла, гашение левого - отрицательный.

Для определения знака погрешности прямого угла плоскость поляризации поляроида P_2 должна быть почти параллельна ребру прямого угла призмы, а плоскость

поляризации поляроида P_1 , ему перпендикулярна. Поляроид P_2 закрывает лишь половину гипотенузной грани или объектива.

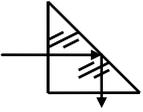
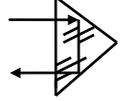
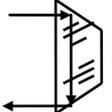
Построив развертки призмы и измерив погрешности взаимного расположения рабочих поверхностей с учетом знаков, получим систему уравнений.

$$\begin{cases} B - C = \delta 45^\circ \\ A = 90^\circ + \Delta 90^\circ \\ A + B + C = 180^\circ \end{cases} \quad (17)$$

Решение системы дает истинную величину углов A, B, C .

На производстве для измерения погрешностей изготовления углов различных типов призм пользуются не прямой, а приведенной ценой деления сетки, которая учитывает показатель преломления стекла, число отражений светового пучка при автоколлимации. В этом случае измеряемая погрешность определяется числом делений сетки.

Таблица 1

№ п/п	Тип призмы	Положение призмы	Погрешность	Угол отклонения в автоколлимационном ходе	Приведенная цена деления
1.	AP-90° (прямоугольная)		$\delta 45^\circ$ π	$3\delta 45^\circ$ $4,3\pi$	2' 1'20"
2.	БР-180° (прямоугольная)		$\Delta 90^\circ$ π	$6,1\Delta 90^\circ$ $6,1\pi$	1' 1'
3.	AP-0° (Дове)		$\Delta 90^\circ$ π	$6,1\Delta 90^\circ$ $6,1\pi$	1' 1'

В зависимости от типа проверяемой детали приведенная цена деления изменяется согласно таблице 1. В таблице 1 указаны значения приведенной цены деления для призм из стекла К8 ($n_d = 1,5163$).

Конструкция автоколлиматора

Свет (рис.18) от источника 1 через призму 2, конденсор 5, наклеенный на пластинку 3 с маркой, направляется на светоделительное зеркало 4, и, отразившись от него, проходит через призму 9, и объектив 7, параллельным пучком падает на контролируемую деталь. Автоколлимационное изображение марки рассматривают на сетке 6 через окуляр 8. Перемещением объектива сопрягают автоколлимационное изображение марки с сеткой окуляра. Предметный столик 11 может быть повернут вокруг вертикальной оси и наклонен винтами 12. Сетка окуляра 6 разворачивается вокруг оси прибора с помощью окулярного кольца с накаткой.

Содержание работы

В процессе выполнения работы необходимо проконтролировать взаимное расположение рабочих поверхностей 3-х прямоугольных призм, работающих как АР-90° или БР-180°.

Методические указания и порядок выполнения работы

1. Измеряемые призмы установить нерабочей (шлифованной) поверхностью на

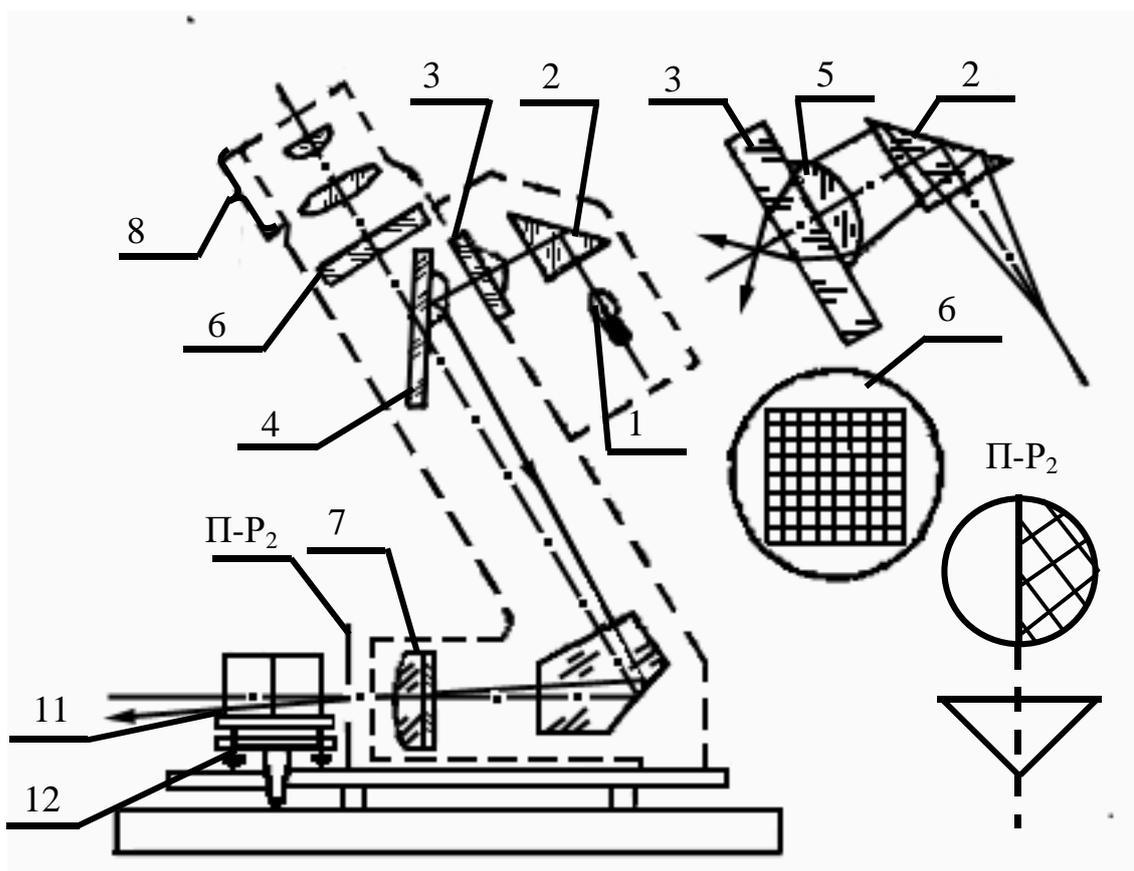


Рис.18. Оптическая схема автоколлиматора

столик прибора.

2. Для измерения δ_{45° призму повернуть катетной гранью к объективу автоколлиматора (рис.18) и, наблюдая автоколлимационные блики, определить величину и знак погрешности.

3. Установить призму гипотенузной гранью к объективу автоколлиматора, винтами наклона столика и его поворотом вокруг вертикальной оси привести наблюдаемые автоколлимационные блики в центр поля зрения.

4. Определить погрешность $\Delta 90^\circ$ по двум неподвижным бликам и пирамидальность призмы по трем подвижным бликам.

5. Надеть на окуляр оправу с поляридом (на оправе указано направление плоскости поляризации) и определить знак погрешности $\Delta 90^\circ$.

6. По полученным данным определить углы измеряемых призм. Отсчеты по сетке автоколлиматора производить с точностью до 0,1 деления шкалы.

7. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ призмы	$\delta 45^\circ$			$\Delta 90^\circ$			π	
	В делениях шкалы	В угловой мере	С учетом знака	В делениях шкалы	В угловой мере	С учетом знака	В делениях шкалы	В угловой мере

Истинные значения измеренных углов поставить на эскизах призм. В центре призмы стрелкой указать направление сходимости ребер призмы - пирамидальность. Если ребра сходятся над призмой, то на эскизе показывают начало стрелки - точка (\cdot), а ниже призмы - конец стрелки – перекрестие (+).

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Краткую теоретическую часть.
2. Оптическую схему прибора с ходом лучей.
3. Результаты измерений, сведенные в таблицу 2.
4. Данные расчета истинных значений углов 45° и 90° .
5. Эскизы призм с указанием рассчитанных углов.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Типы призм, контролируемых методом автоколлимации?
2. Цель определения знака погрешностей?
3. Способы определения знака погрешностей углов?
4. Способ определения знака погрешности прямого угла в поляризованном свете.
5. Почему изменяется приведенная цена деления сетки?

Литература

1. Погарев Г.В..Измерение углов и контроль плоскопараллельных пластинок.- Л.:Изд. ЛИТМО, 1963г.
2. Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А.. Практика оптической измерительной лаборатории. - М.:Машиностроение,1974г.