

**Оптико-механічний коледж
Київського національного університету імені Тараса Шевченка**

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ОМК**

_____ Т. Г. Колесник

«__» _____ 2020 р.

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

ДО ТЕМИ: «ПРИЛАДИ ДЛЯ ЛІНІЙНИХ І КУТОВИХ ВИМІРЮВАНЬ»

З ДИСЦИПЛІНИ: «ОПТИЧНІ І ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ»

для спеціальностей: 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»,
153 «Мікро- та наносистемна техніка», 171 «Електроніка»

Підготував: Сокурєнко О.М.

Затверджено на засіданні ЦК
оптичних дисциплін

Протокол №

Від «__» _____ 2020 р.

Голова циклової комісії:

_____ О. М. Сокурєнко

ЗМІСТ

1 Загальні параметри вимірювальних приладів	3
2 Оптичні відлікові пристрої прямого відліку	3
2.1 Пристрої з відліком шляхом ділення інтервалу на око	3
2.2 Пристрої з відліком по ноніусній шкалі	4
2.3 Пристрої з відліком по шкалі поперечного масштабу	5
3 Відлікові пристрої з мікрометрами	5
4 Окулярна кутомірна головка	10
5 Відлікові мікроскопи	12
6 Прилади для лінійних вимірювань	13
6.1 Оптиметри	13
6.2 Контактні інтерферометри	15
6.3 Для контролю площинності і плоскопаралельності оптичних деталей	16
6.4 Компаратори	18
6.5 Довжиноміри	18
6.6 Товщиноміри	20
6.7 Сферометри	21
7 Прилади для кутових вимірювань	22
7.1 Гоніометри	22
7.2 Оптична ділильна головка	25
7.3 Автоколіматори	26
7.3.1 Автоколіматор з окуляром Аббе	27
7.3.2 Автоколіматори з окуляром Гауса	28
7.3.3 Автоколіматори з окуляром з кубиком і двома сітками	29
7.4 Автоколімаційний мікроскоп	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	31

1 Загальні параметри вимірювальних приладів

Межі вимірювання – найбільше та найменше значення величин, які можуть бути виміряні на даному приладі.

Діапазон вимірювання – різниця між межами.

Ціна поділки шкали приладу – значення вимірюваної величини, що відповідає одному поділу шкали.

Інтервал поділки шкали – відстань між осями двох сусідніх штрихів шкали.

Чутливість – відношення величини переміщення покажчика до зміни вимірюваної величини, що викликала це переміщення.

Поріг чутливості – зміна вимірюваної величини, здатна викликати найменш помітну зміну показання приладу.

2 Оптичні відлікові пристрої прямого відліку

Під прямим відліком мається на увазі зняття відліку по шкалах без попереднього суміщення зображень штрихів.

Перевага способу – висока продуктивність.

Недолік способу – відносно мала точність відліку.

Оптичні системи в таких пристроях призначені тільки для збільшення видимих розмірів поділок шкал. Шкали встановлюють як в площині предмета, так і в площині зображення.

2.1 Пристрої з відліком шляхом ділення інтервалу на око

За шкалою візирного мікроскопа **МИР-2** (рис. 1) виконують безпосереднє вимірювання об'єктів невеликого розміру, зображення яких не перевищує довжини шкали.

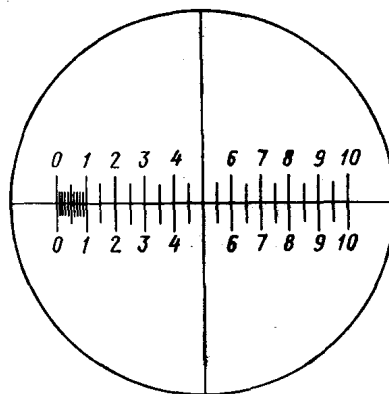


Рисунок 1 – Поле зору мікроскопа МИР-2

Якщо розмір зображення об'єкта дорівнює N поділам шкали, то величина самого об'єкта дорівнює sN , де s – ціна поділу шкали, яка залежить від фокусної відстані об'єктива і довжини тубуса мікроскопа і визначається за таблицею, що додається до приладу, або більш точно за допомогою об'єкт-мікрометра (еталонної

міри довжини). На око розмір зображення, тобто число N , можна визначити з точністю до 0,1 поділу.

Так, наприклад, якщо $c = 0,04$ мм, то похибка відліку дорівнює 0,004 мм.

Найкраща точність оцінки частки поділу забезпечується при видимій ширині поділу 1,5 мм з відстані 250 мм. Практично хороші результати дають шкали з інтервалом 1...2 мм. Крім того, видима товщина штрихів основної шкали і індексу повинна бути близько 0,1 інтервалу (тобто від 0,1 до 0,2 мм).

На рис. 2 приведено поле зору відлікового мікроскопа оптичної ділильної головки ОДГ-60.

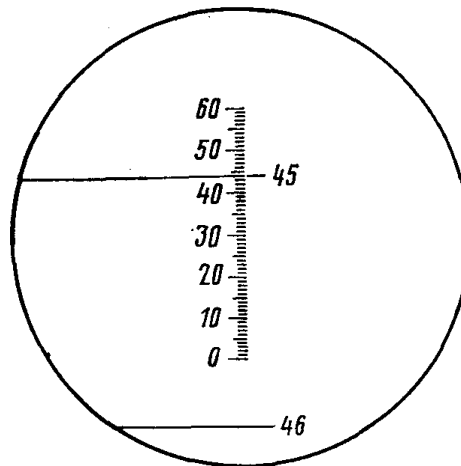


Рисунок 2 – Поле зору відлікового мікроскопа ОДГ-60

Довгі штрихи представляють собою зображення градусних штрихів лімба. Нерухома окулярная шкала має 60 малих поділок, причому довжина цієї шкали дорівнює відстані між зображеннями сусідніх градусних штрихів, тобто ціна одного малого поділу дорівнює $1''$. На рис. 2 відлік дорівнює $45^{\circ} 44'$.

2.2 Пристрої з відліком по ноніусній шкалі

Ноніусною називається шкала, що має поділки дещо більші чи менші поділок основної шкали, що дозволяє за номером суміщеного штриха шкали ноніуса здійснювати оцінку частини поділки основної шкали. В основі відліку за ноніусом лежить здатність очей більш точно визначати збіг або розбіжність штрихів двох зімкнутих шкал (рис. 3, б), ніж оцінювати частку d поділу a шкали (рис. 3, а).

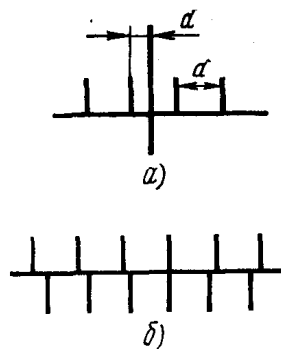


Рисунок 3 – Відлікові шкали: а – шкала з покажчиком, б – шкала з ноніусом

2.3 Пристрої з відліком по шкалі поперечного масштабу

Шкала поперечного масштабу (трансверсальна сітка) показана на рис. 4.

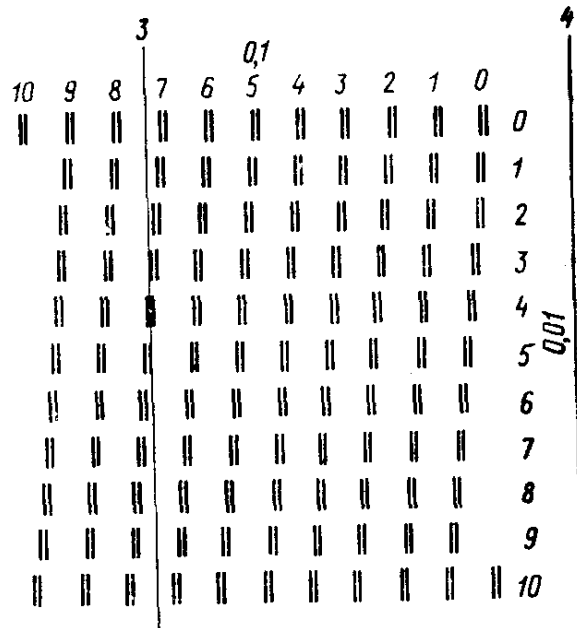


Рисунок 4 – Вигляд відлікової шкали ИЗП-36М для станків

Довгі штрихи є зображення штрихів міліметрової шкали. Великий міліметровий інтервал розділений бісекторами по горизонталі на десять частин з ціною одного поділу 0,1 мм. У свою чергу, кожен малий інтервал з ціною 0,1 мм розділений також на десять частин за допомогою одинадцяти бісекторів, рознесених по вертикалі і зсунутих по горизонталі на однакову величину з ціною 0,01 мм. На рис. 4 відлік дорівнює 3,74 мм. При високій якості зображення можлива оцінка на око і тисячних часток міліметра.

Трансверсальні сітки використовують в катетометрах, відлікових пристроях верстатів і інших приладах.

3 Відлікові пристрої з мікрометрами

Оптико-механічним мікрометром називають пристрій зі шкалою, що зміщується, за допомогою якого вимірюють величину об'єкта по числу поділок шкали, розташованій в площині предмета або в площині його зображення.

Об'єкти бувають:

- *Кінцевими* (звичайні предмети)
- *Штриховими* (шкали).

При вимірюваннях об'єкта виникає необхідність наведення марки на деякі точки предмета або штрихи шкали.

Найпростішою маркою, призначеною для візування на обрану точку вимірюваного кінцевого виробу, є перехрестя. На рис. 5 показані два способи установки перехрестя.

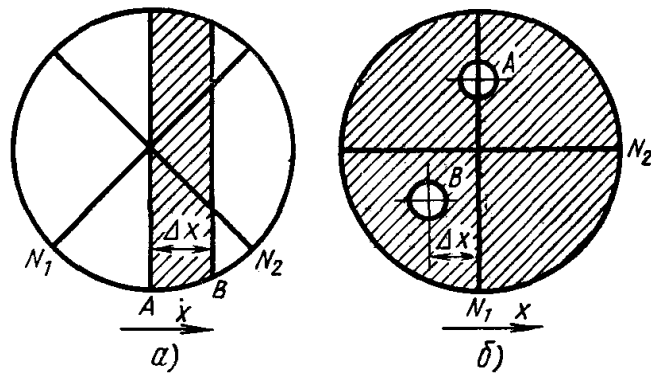


Рисунок 5 – Приклади наведення окулярної сітки:
 a – похиле перекриття; b – пряме перекриття

У випадку a окулярна сітка встановлена так, що лінії перехрестя N_1 і N_2 становлять кути 45° з напрямом x переміщення виробу. Такий спосіб установки зручний в тому випадку, коли потрібно виміряти відстань Δx між двома прямолінійними і паралельними краями A і B виробу. Точність такого суміщення перехрестя з краєм виробу виходить вище, ніж у випадку встановлення лінії перехрестя N_1 або N_2 паралельно краю виробу. В останньому випадку точність дорівнює роздільній здатності ока, що працює спільно з оптичною системою.

Якщо потрібно виміряти, наприклад, різницю координат центрів двох отворів A і B (рис. 5, b), то поворотом окулярної сітки встановлюють одну з ліній перехрестя паралельно напрямку x переміщення виробу (або сітки) і по черзі поєднують центри отворів з іншою лінією.

Для наведення на зображення штриха або на поділку шкали зазвичай застосовують марку, виконану у вигляді одиночного штриха-індексу A (рис. 6, a) або бісектора B (рис. 6, b), який представляє собою дві тонкі, близькі одна до одної паралельні лінії.

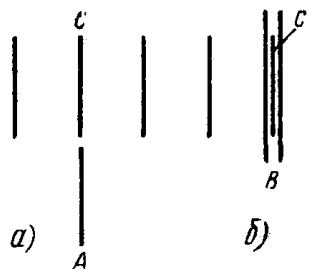


Рисунок 6 – Суміщення штриха шкали і марки: a – ноніальне; b – бісекторне

При ноніальному суміщенні штрихів зображення вибраного штриха C шкали встановлюють так, щоб цей штрих здавався продовженням індексу A .

При бісекторному суміщенні штрихів зображення штриха C вводять всередину бісектора B і встановлюють по його осі симетрії. В обох випадках досягається висока точність наведення, що дорівнює $0,1 \dots 0,2$ роздільної здатності ока, яке працює спільно з оптичною системою.

Роздільна здатність ока в оптимальних умовах (освітленості $50 \dots 75$ лк, контрасті зображення близькому до одиниці, зіниці ока 2 мм), досягає $60''$, що в лінійній мірі становить $0,075$ мм з відстані спостереження 250 мм.

При роботі ока спільно з оптичною системою, збільшення якої дорівнює Γ , точність наведення прийнято вважати в Γ разів більше роздільної здатності ока.

Бісекторний спосіб має вищу точність, ніж ноніальний:

- ноніального наведення $[(10 \div 12) / \Gamma]''$ або $[(0,013 \div 0,015) / \Gamma]$ мм;
- бісекторного наведення $[(6 \div 8) / \Gamma]''$ або $[(0,007 \div 0,009) / \Gamma]$ мм.

Типи оптико-механічних мікрометрів:

- **Гвинтовий окулярний мікрометр** (МОВ-1-15^x, МОВ-5-15^x);
- **Спиральний окулярний мікрометр** (ОМС).

Гвинтовий окулярний мікрометр являє собою поєднання механізму мікрометричної пари (гвинта і гайки) з оптичним пристроєм (окулярном і сітками).

Принцип роботи мікрометра наступний (рис. 7).

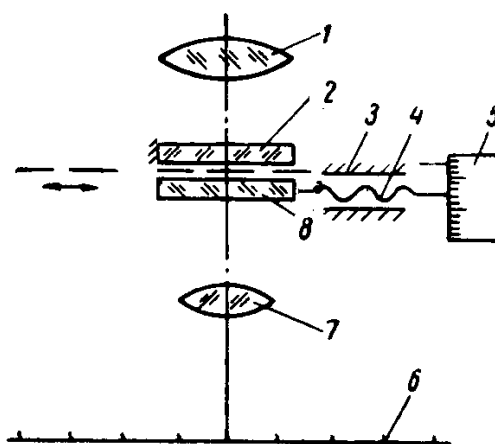


Рисунок 7 – Принципова схема гвинтового окулярного мікрометра

У фокальній площині окуляра розміщені дві сітки: нерухома (зі шкалою) і рухома (з перехрест'ям і візирними штрихами). За допомогою гвинта і гайки рухома сітка переміщається відносно нерухомої. Мікрометр встановлюється на тубусі мікроскопа замість звичайного окуляра так, щоб площина зображення основної шкали, що проектується об'єктивом мікроскопа, розташувалася між площинами сіток 2 і 8.

На корпусі мікрометра **МОВ-1-15^x** 3 (рис. 8, а) встановлено компенсаційний окуляр **1** зі збільшенням 15^x, що має переміщення уздовж осі ± 5 діоптрій.

Корпус забезпечений хомутиком **6**, за допомогою якого мікрометр кріпиться на стандартному тубусі мікроскопа діаметром 25 мм. У середині корпусу, в фокальній площині окуляра знаходиться нерухома сітка **2** з вісьмома міліметровими поділками і майже впритул з нею – рухома сітка **8**, на якій нанесені перехрест'я і біштрих (рис. 8, б). Лінії перехрест'я складають кути 45° з напрямом його переміщення. Переміщення сітки **8** здійснюють обертанням барабана **4** мікрометреного гвинта **5** з кроком 1 мм. Барабан гвинта має 100 поділок. Ціна поділу дорівнює 0,01 мм. З боку об'єктива мікроскопа мікрометр закритий захисною скляною пластинкою **7**.

По нерухомій сітці відраховуються цілі міліметри, а по барабанчику – десяті і соті долі.

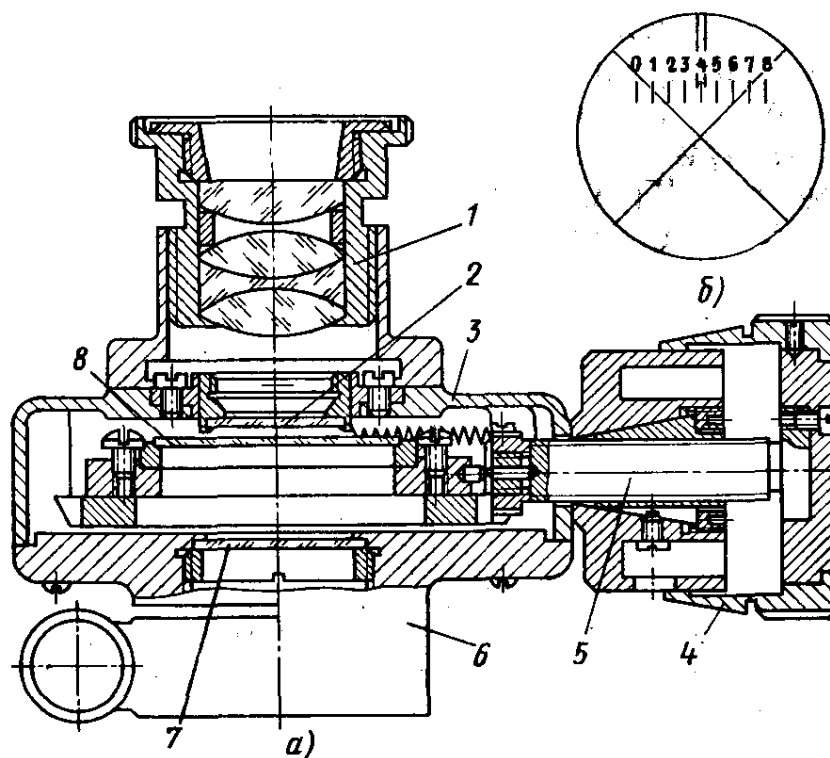


Рисунок 8 – Гвинтовий окулярний мікрометр МОВ-1-15^х
а – загальний вигляд; б – поле зору окуляра

На рис. 9, а показана принципова схема мікрометра МОВ-5-15^х.

Відмінною особливістю цього мікрометра є можливість одночасного грубого (1 мм) і тонкого (0,01 мм) відліку в одному полі зору. З цією метою вимірювальний механізм влаштований таким чином, що при повороті рукоядки-гайки 3 дискова шкала 1 обертається без осьового зміщення відносно корпусу 2, а мікрогвинт 4 зміщується без повороту.

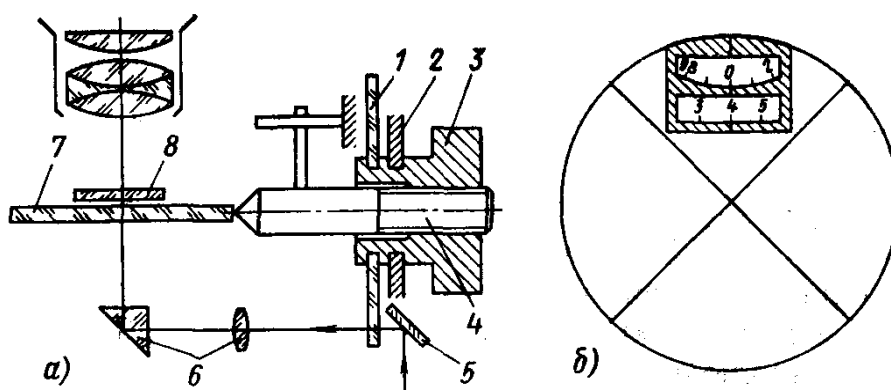


Рисунок 9 – Гвинтовий окулярний мікрометр МОВ-5-15^х:
а – принципова схема; б – поле зору окуляра

Мікрометр забезпечений також системою підсвічування 5 і проекції 6 шкали 1 в площину рухомої 7 і нерухомої 8 сіток. На рухомій сітці нанесено візирне

Спиральний окуляр-мікрометр відрізняється від гвинтового тим, що в ньому роль бісектора, що переміщується, грають витки подвійної архімедової спіралі, що обертається навколо осі кульки.

Мікрометр складається з окуляра і двох сіток; нерухомої і обертової, встановлених одна над іншою. На верхній нерухомій сітці нанесені індекс і лінійна рівномірна шкала (ноніус) з 10 поділками з ціною поділу 0,1 мм. На нижній поворотній сітці нанесена подвійна спіраль Архімеда і кругова шкала, що має 100 рівних поділок. Крок архімедової спіралі дорівнює інтервалу поділок шкали сітки, тобто 0,1 мм. Таким чином, за один оберт сітки будь-яка точка спіралі переміститься для спостерігача на 0,1 мм по радіусу від центра або до центра в залежності від напрямку обертання.

The drawing consists of two parts. Part (a) is a detailed cross-sectional view of a mechanical assembly. It features a central vertical shaft with several components labeled with numbers: 1 (a handle or lever on the left), 2 (a component on the left side of the shaft), 3 (a component on the left side of the shaft), 4 (a component at the top), 5 (a component on the right side of the shaft), 6 (a component on the right side of the shaft), 7 (a component on the right side of the shaft), and 8 (a component at the bottom). Part (b) is a circular scale or dial. It has a central vertical line with a triangular pointer at the top. The scale is marked with numbers: 13 at the top, 80, 75, 70, 65 on the left side, and 0, 1, 2, 12, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 on the right side. The scale is divided into horizontal lines, and the numbers are arranged in a circular pattern.

9

Мікроскоп має об'єктив 8 з збільшенням 5^{\times} і окуляр 4 зі збільшенням $12,5^{\times}$. На нерухомій окулярній сітці 3 нанесені лінійна шкала (10 поділок) і індекс. На сітці 2, що повертається від маховичка 1, нанесені одинадцять витків подвійної спіралі Архімеда і кругова шкала, розділена на 100 частин. Віссю обертання сітки 2 служить сталевий кулька діаметром 3 мм. Знизу сітка притискається двома пружними роликками 6 до регульованих роликів 5. Гвинтом 7 окуляр разом з ноніусним механізмом може переміщатися в поперечному напрямку для налаштування на нульовий відлік.

Вигляд поля зору окуляра показаний на рис. 10, б. Довгі оцифровані штрихи є зображенням міліметрової шкали, що дається об'єктивом мікроскопа (штрихи "11", "12" і "13"). Ціна одного витка спіралі і ціна поділу нерухомої шкали дорівнюють 0,1 мм, а ціна малого поділки кругової шкали – 0,001 мм.

Для проведення відліку необхідно поворотом маховичка 1 встановити шкалу 2 так, щоб штрих міліметрової шкали, що знаходиться в зоні витків, виявився точно посередині між лініями найближчого до нього витка спіралі. Індексом для відліку міліметрів служить нульовий штрих нерухомої шкали. На рис. 10, б штрих "12" пройшов нульовий штрих шкали десятих часток, а штрих "13" ще не дійшов до нього. Відлік дорівнює 12 мм плюс відрізок від штриха "12" до нульового штриха. В даному випадку число десятих в цьому відрізку дорівнює двом. Соті і тисячні частки міліметра відраховують по круговій шкалі. Остаточно відлік дорівнює 12,2725 мм. Похибка вимірювання спіральним окулярним мікрометром не перевищує $\pm 0,7$ мкм.

4 Окулярна кутомірна головка

Окулярна кутомірна головка є універсальним вимірювальним мікрометром. Її застосовують для кутових і лінійних вимірювань.

Ця головка знімна і входить в комплект універсального вимірювального і інструментального мікроскопів.

На рис. 11 мікроскоп показаний разом з освітлювачем 6. Захисне скло 5 служить для запобігання від забруднення оптичної системи при зміні головки. Головка 3 складається з двох основних частин: візирної і кутомірної.

Візирна частина містить об'єктив 7, окуляр 1 візирного мікроскопа і візирну сітку 2, яка служить для наведення мікроскопа на вимірюваний об'єкт.

Кутومیрна частина складається з скляного лімба 4 з градусними поділками, відлікового мікроскопа 10, освітлювального дзеркала 8.

Ціна поділу лімба 1° . При обертанні головки лімб разом з візирною сіткою 2 може повертатися в межах 360° . Відліковий мікроскоп складається з об'єктива, окуляра і сітки зі шкалою 9. Сітка має 60 поділок з ціною поділки $1'$. Об'єктив відлікового мікроскопа проектує зображення штрихів лімба 4 в площину сітки 9. Збільшення відлікового мікроскопа 42^{\times} .

Число градусів визначають по штриху лімба, що знаходиться в межах ноніусної (хвилинної) шкали. Хвилини визначають за шкалою, індексом при цьому служить той же штрих лімба.

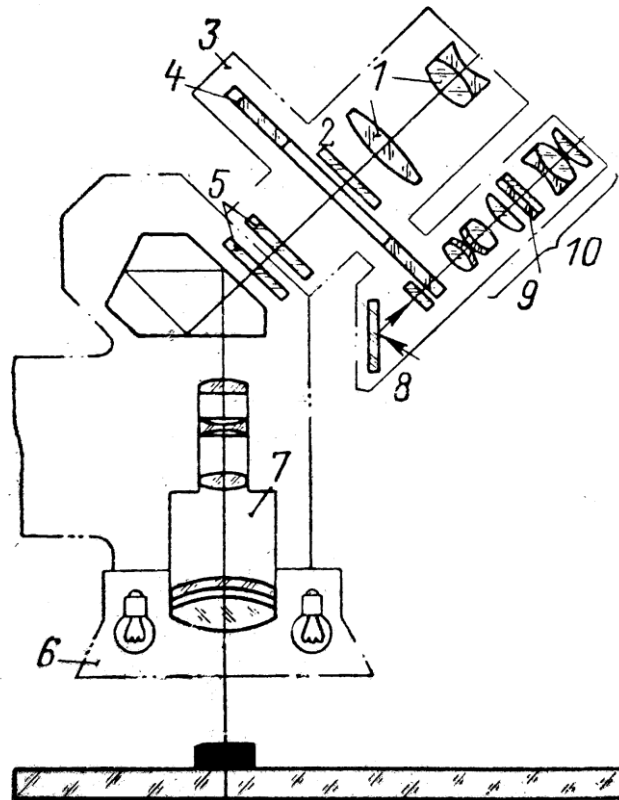


Рисунок 11 – Оптична схема кутомірної головки з мікроскопом

У головок універсального вимірювального і інструментального мікроскопів застосовують візирну сітку, показану на рис. 12, б.

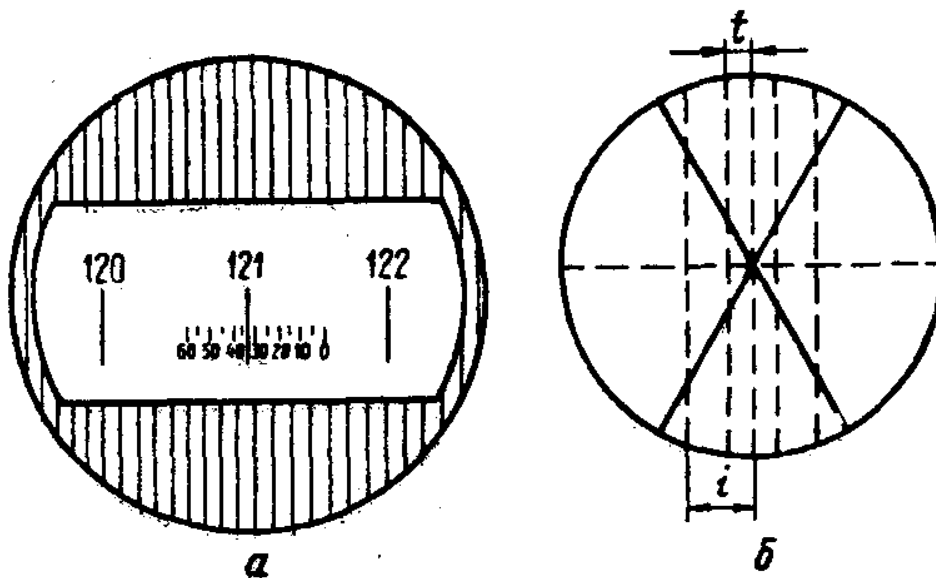


Рисунок 12 – Поле зору кутомірної головки:
а – відлікового мікроскопа; б – візирного окуляра

На рисунку відлік відповідає $121^{\circ}34'$. Допускається визначення на око до $0,5'$ (половини поділу).

5 Відлікові мікроскопи

Найбільш простим оптичним відліковим пристроєм є лупа, за допомогою якої під збільшенням виконується відлік за індексом або ноніусом. Лупою можна користуватися в тому випадку, коли шкала, по якій проводиться відлік, і індекс або ноніус знаходяться в одній площині. Відліковий мікроскоп має перед лупою ту перевагу, що дозволяє робити відлік і в тому випадку, коли шкала і індекс розташовані в різних площинах.

У мікроскопах об'єкт, що вимірюється, розташований від об'єктива на відстані, яка називається *робочою відстанню*. Це відстань може змінюватися в залежності від об'єктива від часток міліметра до десятків міліметрів. Тому за допомогою мікроскопа можна вимірювати об'єкти, які розташовані в важкодоступних місцях (поглиблення).

Основна шкала розташована в предметній площині мікроскопа, об'єктив якого проектує її зображення в площину зображення мікроскопа, де розташована сітка з індексом або відліковою шкалою.

За конструкцією окулярної частини **відлікові мікроскопи можна поділити** на:

- *штрихові;*
- *шкалові;*
- *мікроскопи-мікрометри.*

Штриховий мікроскоп є найбільш простим відліковим мікроскопом, на сітці якого нанесено індекс у вигляді штриха, двох паралельних штрихів (бісектор) або марки.

Шкаловим називається відліковий мікроскоп, на сітці якого нанесена відлікова шкала (рис. 13). Відлік на рис. 13 відповідає $23^{\circ} 16' 30''$.

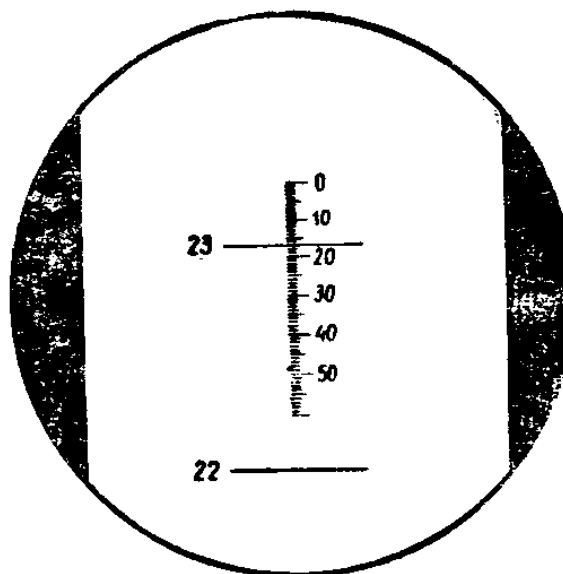


Рисунок 13 – Поле зору мікроскопа зі шкаловою відліковою системою

Варіантом шкалового мікроскопа є *мікроскоп-ноніус*. У ньому відлік проводиться так само, як відлік по звичайному ноніусу, тобто частки інтервалу основної шкали оцінюються по співпадінню одного з штрихів основної шкали з відповідним штрихом ноніуса.

Мікроскоп-мікрометр відрізняється від інших відлікових мікроскопів наявністю в окулярній частині відлікового пристрою у вигляді оптико-механічного мікрометра. Ці мікрометри в поєднанні з мікроскопом служать для точного вимірювання часток інтервалу основної шкали, а в поєднанні з зоровими трубами – для точного вимірювання дуже малих кутових або лінійних зміщень.

6 Прилади для лінійних вимірювань

6.1 Оптиметри

Найбільш поширеними представниками важільно-оптичних приладів є *оптиметри*.

Оптиметри діляться на:

- *Вертикальні;*
- *Горизонтальні.*

Залежно від пристрою оптиметра шкала і показчик можуть спостерігатися в окуляр або проектуватися на екран.

Оптиметри з ціною поділу 0,001 мм:

- вертикальний оптиметр з окуляром;
- вертикальний оптиметр з проекційним екраном;
- горизонтальний оптиметр з окуляром;
- горизонтальний оптиметр з проекційним екраном.

Існують і вертикальні оптиметри з проекційним екраном з ціною поділу 0,0002 мм.

На рис. 14, а показана принципова оптична схема *оптиметра ОВО-1*.

Денне світло або світло від лампочки направляється шарнірно закріпленим дзеркалом і прямокутної призмою підсвічування 2 на ліву частину сітки 3, де нанесена шкала з поділами і цифрами. Шкала розташована в фокальній площині об'єктива 5, тому автоколімаційне зображення шкали розташовується в цій же площині, але в правій частині сітки. Дзеркало 6 нахиляється в невеликих межах під дією вимірювального стрижня 7. Нижній кінець стрижня знаходиться в контакті з виробом, що вимірюється 7. Поворот дзеркала 6 викликає вертикальне зміщення зображення шкали, яке спостерігається в окуляр 1 і відраховується по нерухомому показчику.

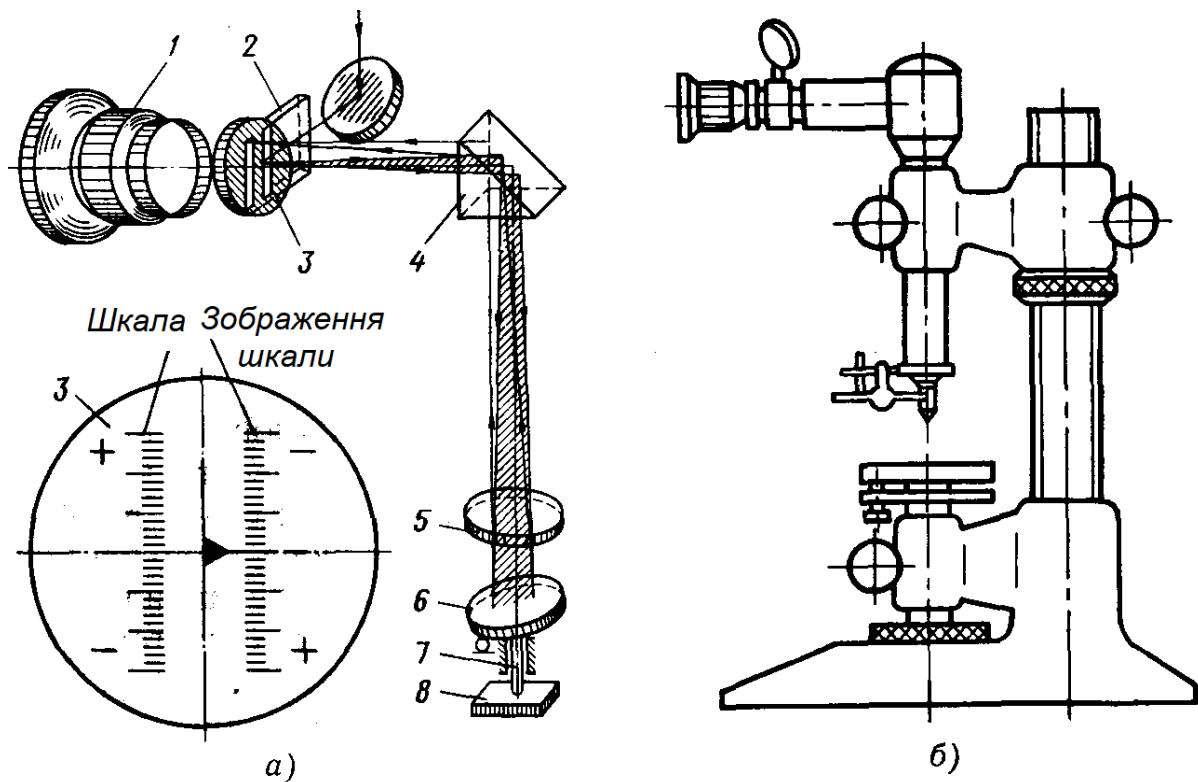


Рисунок 14 – Оптиметр ОВО-1: а – схема трубки; б – зовнішній вигляд оптиметра

На рис. 14, б показаний вертикальний оптиметр ОВО-1. Основні вузли оптиметра (підстава 2, колонка 3, кронштейн 4, столик 5) призначені для жорсткого кріплення трубки 1 в обраному положенні і для установки виробу, що вимірюється.

Ультраоптиметри – оптиметри підвищеної точності.

На рис. 15, а показана схема **ультраоптиметра ОВЭ-02** з ціною поділу 0,0002 мм.

Світло лампи 1 через конденсор, світлофільтр і призму 2 проходить до сітки 3, відбивається дзеркалом на об'єктив 4 і паралельним пучком променів падає на дзеркальний оптичний помножувач 5-6. Дзеркало 6 пов'язано важільною передачею з вимірювальним стрижнем 7 і відхиляється при переміщенні останнього. Світло після багаторазового відбиття в оптичному помножувачеві (рис. 15, б) повертається в об'єктив 4, проходить через сітку 3 і проєкційний об'єктив 8. За допомогою дзеркал 9, 10 і 12 зображення шкали проєктується на екран 11.

Велике передавальне відношення ультраоптиметра визначається числом відбивання променя від рухомого дзеркала і дією додаткової проєкційної системи зі збільшенням $\beta_{\text{пр}}$:

$$i_p = \frac{2Nf'}{L} \beta_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 200}{5} \cdot 17 = 6800.$$

При такому передавальному відношенні інтервал шкали на екрані дорівнює $0,0002 \cdot 6800 = 1,4$ мм.

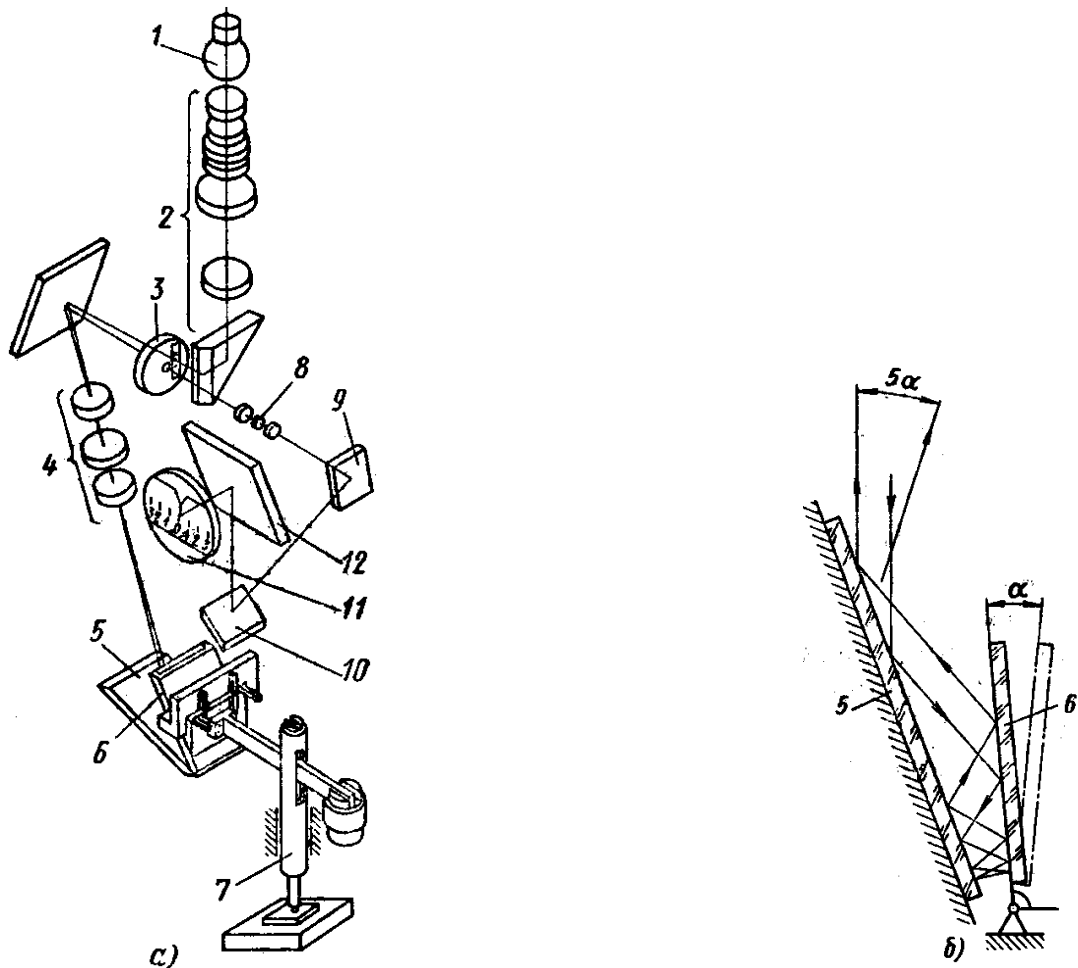


Рисунок 15 – Ультраоптиметр ОВЭ-02:
 а – принципова схема; б – дзеркальний помножувач

6.2 Контактні інтерферометри

Контактні інтерферометри працюють за схемою інтерферометра Майкельсона, рухливе дзеркало якого жорстко пов'язане з вимірювальним накінецьником. Як вертикальний (ИКПВ), так і горизонтальний (ИКПГ) інтерферометри мають однакові інтерференційні трубки, оптична схема яких показана на рис. 16.

Світло від лампи 1 після конденсора 2 паралельним пучком направляється через діафрагму 3 на розділову пластинку 6. У горизонтальній гілці світло відбивається від поворотного дзеркала 5, а у вертикальній – від рухомого дзеркала 12, закріпленого на вимірювальному стрижні 13. Об'єктив 7 проектує інтерференційну картину смуг рівної товщини в площину сітки 8. Вертикально розташовані інтерференційні смуги і нанесена на сітку шкала спостерігаються через окуляр 10, який може повертатися навколо горизонтальної осі 9 для спостереження різних ділянок сітки. Шкала градується в монохроматичному світлі при включеному світофільтрі 4.

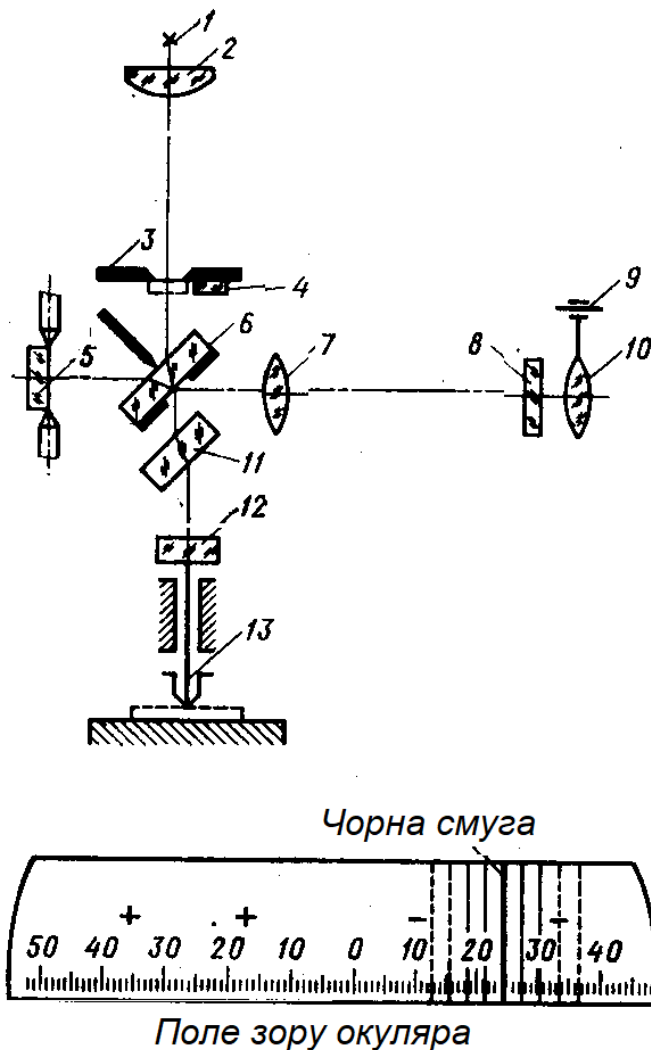


Рисунок 16 – Схема трубки інтерферометра

Для вимірювань фільтр вимикають. Видима в білому світі картина містить ахроматичну (чорну) смугу і по боках від неї по три – чотири забарвлених смуг. Чорна смуга служить рухливим покажчиком положення вимірювального стрижня.

При контакті накінецьника з еталонною мірою чорну смугу поєднують з нульовим штрихом шкали. Для цього доводиться зміщувати предметний стіл (тобто зміщувати смуги) або в невеликих межах зміщувати саму шкалу. Потім встановлюють на стіл деталь, що вимірюється, і по положенню чорної смуги відраховують різницю довжин.

Контактні інтерферометри застосовуються з ціною поділки 0,05 і 0,1 мкм.

6.3 Для контролю площинності і плоскопаралельності оптичних деталей

Інтерферометр ИПП-15 призначений для контролю площинності і плоскопаралельності оптичних деталей діаметром до 140 мм.

Оптична схема **інтерферометра ИПП-15** зображена на рис. 17.

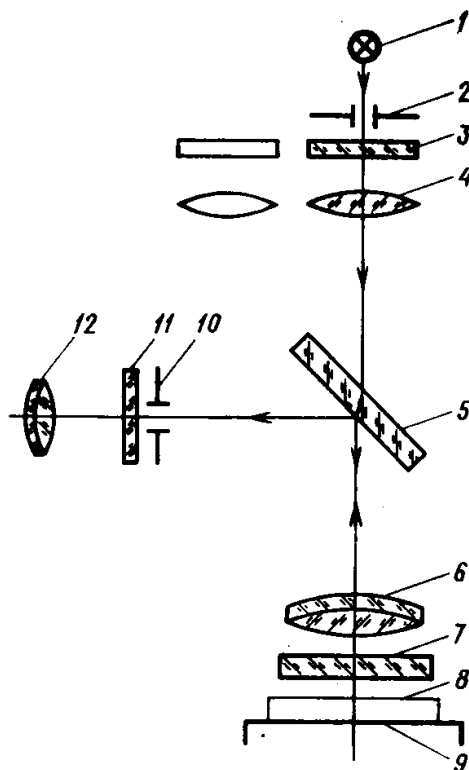


Рисунок 17 – Інтерферометр для контролю площинності

Ртутна лампа 1 освітлює щілину змінної ширини 2 (вхідна зіниця), яка встановлюється в фокальній площині об'єктива 6. Між щілиною і об'єктивом світло проходить через напівпрозору пластину 5. Паралельний пучок променів освітлює встановлену на столі 9 з зазором між пластинами 1...3 мм. Пучки променів, відбившись від двох пластин, інтерферують і утворюють картину смуг рівної товщини, локалізовану на верхній поверхні контрольованої деталі. Пучки променів, що інтерферують проходять об'єктив 6, відбиваються від пластини 5 і збираються в площині діафрагми 10.

Ширина і напрямок смуг встановлюються нахилом і поворотом столика разом з деталлю. Столик може обертатися навколо вертикальної осі і нахилитися в двох площинах за допомогою мікрометричних гвинтів.

Якщо відступ N контрольованої поверхні від площини становить одне кільце і більш, то доцільно картину робити осесиметричною, тобто еталонну пластину і деталь виставляти паралельно.

Якщо відступ N менш одного кільця, то між пластинами слід вводити клин такої величини, щоб спостерігалось 3...4 смуги. Для вимірювання викривлення цих смуг між об'єктивом і еталонною пластинною натягнута нитка, яка допомагає у відліку величини стрілки прогину смуг.

Світлофільтр 3, який виділяє зелену лінію ртуті ($\lambda=546,1$ нм), включається в хід променів в тому випадку, коли треба збільшити повітряний зазор або треба знати точне значення λ .

Вимірювання плоскопаралельності здійснюється в результаті спостереження кілець рівного нахилу, отриманих від поверхонь контрольованої пластини, при переміщенні столу з деталлю в горизонтальній площині. Для цього включається

лінза 4, що проектує спільно з об'єктивом 6 вхідну зіницю на пластину, що контролюється. Еталонна пластина нахиляється на кут $2...3^\circ$, а кільця спостерігаються на сітці 11 в окуляр 12. Зміна товщини пластини на $\lambda/2n$, де n - показник заломлення матеріалу, викликає появу або зникнення в центрі картини одного кільця.

6.4 Компаратори

Компаратори – прилади, призначені для вимірювання штрихових і кінцевих об'єктів шляхом безпосереднього порівняння їх з штриховими зразковими шкалами.

Компаратор складається з двох частин: об'єктної і відлікової.

До об'єктної частини відноситься пристрій для установки вимірюваного об'єкта і наводить пристрій, наприклад, візирний мікроскоп або вимірювальний стрижень.

До відлікової частини відноситься відліковий мікроскоп і зразкова шкала. В процесі вимірювання два з чотирьох названих компонентів рухливі, а два інших – нерухомі.

Компаратор Аббе (рис. 18) з розташуванням лінії вимірювання об'єкта 1 і зразковою шкали 5 на одній прямій, причому об'єкт і шкала знаходяться на каретці 6, що переміщається уздовж лінії вимірювання, а візирний 2 і відліковий 3 мікроскопи нерухомо встановлені на стійці 4.

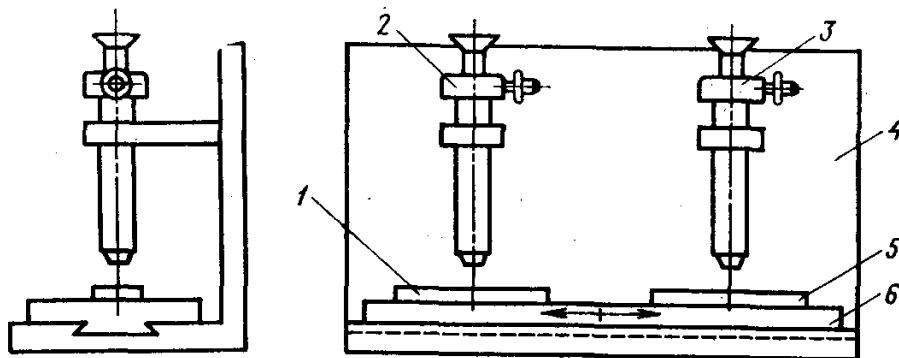


Рисунок 18 – Принципова схема компаратора ИЗА-2

За такою схемою побудований **компаратор ИЗА-2**, який застосовується при вимірюваннях різних об'єктів по одній координаті, наприклад, спектрограм, шкал і сіток.

Межі вимірювання компаратора ИЗА-2 0...200 мм, ціна поділу основної шкали 1 мм, ціна поділу спірального окулярного мікрометра в відліковому мікроскопі 0,001 мм. Збільшення візирного мікроскопа $7...10,5^{\times}$.

6.5 Довжиноміри

Довжиноміри призначені для абсолютних (до 100 мм) і порівняльних (понад 100 мм) вимірювань довжин контактним способом. У цих компараторних приладах

об'єкт і відліковий мікроскоп нерухомі, а жорстко пов'язані між собою вимірювальний стрижень і зразкова шкала при вимірюванні переміщуються.

На рис. 19, *а* і *б* показано пристрій і схема **вертикального довжиноміра ИЗВ-1** (позиції загальні).

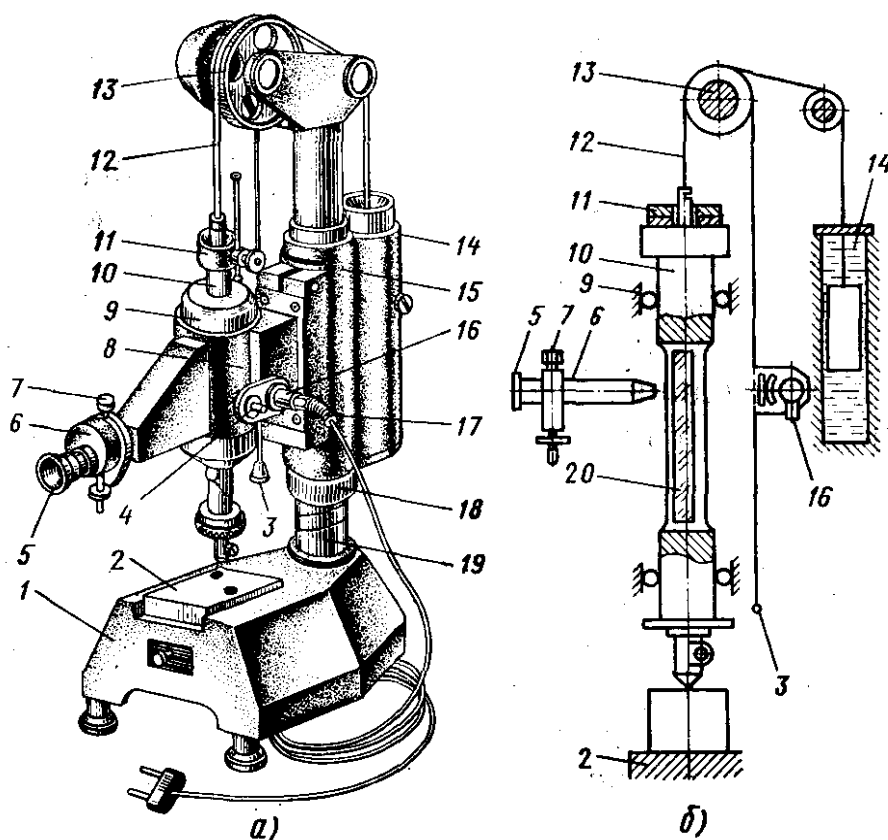


Рисунок 19 – Вертикальний довжиномір ИЗВ-1:
а – зовнішній вигляд; *б* – кінематична схема

На масивній підставці *1* закріплений ребристий столик *2* і колонка *19*. На колонці гайкою *18* переміщається корпус приладу, закріплений в потрібному положенні гвинтами *15*. На корпусі закріплений кронштейн *8* з освітлювачем *16*, мікроскопом *6* і направляючої *9* для вимірювального плунжера *10* з зразковою шкалою *20*. Сталева стрічка *12*, перекинута через блок *13*, з'єднує плунжер з противагою, поміщеною в демпфер *14* з вазеліновим маслом. Демпфер забезпечує малу швидкість опускання плунжера і запобігає вимірювальний наконечник від удару. Плунжер піднімається через трос з рукояткою *3* і закріплюється гвинтом *4*. Вимірювальне зусилля приладу регулюється вантажними шайбами *11* в межах від 75 до 250 сН.

Зразкова шкала *20* має 100 міліметрових поділок. Ця шкала розглядається в відліковий мікроскоп *6*, який містить спіральний окулярний мікрометр з ціною поділу 0,001 мм. Окуляр *5* може переміщуватися у вертикальному напрямку гвинтом *7* для установки на нуль.

Верхня межа вимірювання довжиноміра, обмежена конструкцією стійки, дорівнює 250 мм. При вимірюванні розмірів понад 100 мм прилад налаштовують по кінцевим мірам довжиною 100 або 150 мм.

Рухомий мікроскоп, предметний столик і стрілочний індикатор після звільнення затискних гвинтів 5 і 6 можуть бути встановлені у обраному положенні.

Обидва мікроскопа мають автоколімаційні окуляри 7 з куб-призмами. Оптичні осі мікроскопів поєднані і проходять через центр отвору предметного столика. Поєднання оптичних осей характеризується збігом зображень сіток. Переміщення мікроскопа 8 фіксується стрілочним індикатором.

Перед вимірами рухливий мікроскоп 8 встановлюють на стійці 4 таким чином, щоб в окуляр кожного мікроскопа було чітко видно зображення марки протилежного мікроскопа. При цьому індикатор ставлять на нуль або фіксують початковий відлік N_1 .

Деталь, що вимірюється 9 кладуть на предметний столик 10. Переміщенням столика 10 домагаються отримання автоколімаційного зображення від нижньої поверхні деталі. Це зображення розглядається в мікроскоп 12. Потім, переміщуючи верхній мікроскоп 8, отримуємо автоколімаційне зображення від верхньої поверхні деталі. Робимо другий відлік по індикатору N_2 . Різниця відліків по індикатору становить товщину деталі, що вимірюється. У разі вимірювання деталі, товщина якої перевищує витрати індикатора, розміщують додаткову кінцеву міру 2.

6.7 Сферометри

Сферометри – прилади, призначені для вимірювання радіусів кривизни випуклих і увігнутих сферичних поверхонь.

Схема *кільцевого настільного сферометра* приведена на рис. 21.

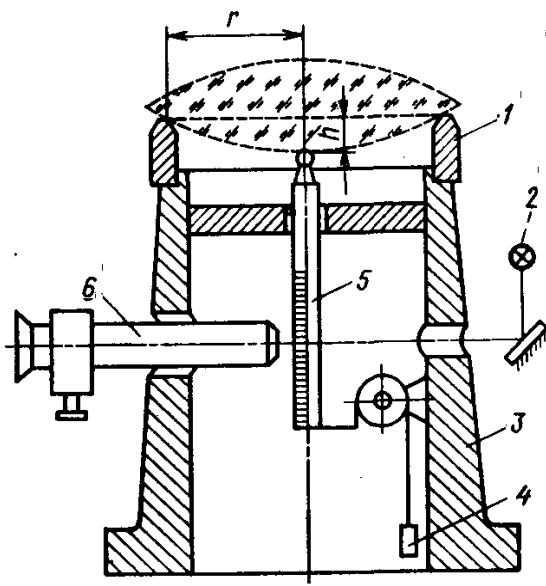


Рисунок 21 – Принципова схема сферометра

Вимірювальна частина мало відрізняється від довжиноміра ИЗВ-1.

Усередині масивного корпусу 3 по точним направляючим переміщується вимірювальний стрижень 5 з вбудованою міліметровою шкалою і контактною кулькою на кінці. Положення шкали відліковується за допомогою мікроскопа 6 зі

спіральним окулярним мікрометром. Шкала підсвічується освітлювачем 2. Противага 4 прагне підняти вимірювальний стрижень вгору до дотику кульки з поверхнею лінзи, що вимірюється. На верхню частину корпусу насаджуються змінні опорні сталеві кільця 1.

Контактним сферометром безпосередньо вимірюється висота кульового сегмента h , а по ній і радіусу опорного кільця r розраховується радіус кривизни поверхні R значення радіуса кільця r наводиться в атестаті на прилад.

Є ряд конструктивних варіантів кілець: із суцільною стрічковою ножовою кромкою, з фаскою, з кульковими опорами. Кільця з кульками, встановленими під кутом 120° , довговічніше звичайних кілець, так як у міру зносу кульки можна повернути в опору і змусити працювати інші ділянки.

При вимірюванні радіуса кривизни R окремої сферичної поверхні на прилад встановлюють спочатку пластину з плоскою поверхнею, а потім контрольовану деталь. Різниця отриманих відліків за шкалою дає деяку умовну стрілку прогину h поверхні. Величина R обчислюється за формулою:

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} \pm \rho,$$

де r – радіус кільця і ρ – радіус кульки вказані в атестаті: знак плюс беруть для увігнутої поверхні, знак мінус – для опуклої.

7 Прилади для кутових вимірювань

7.1 Гоніометри

Гоніометри – оптичні прилади для вимірювання кутів між плоскими полірованими гранями різних деталей, а також для вимірювання кутів відхилення променів, що проходять через призми і клини, виготовлені зі скла або інших прозорих матеріалів. В оптичному виробництві гоніометри застосовують для вимірювання кутів, пірамідальності призм, показника заломлення і дисперсії прозорих матеріалів.

Вимірювання кутів на гоніометрах здійснюється абсолютним методом, тобто шляхом порівняння з точно градуйованим лімбом (круговою шкалою). При порівнянні використовуються коліматори і зорові труби або автоколіматори, а також відлікові пристрої.

Принципова оптична схема **гоніометра ГС-10** показана на рис. 22, а.

У фокальній площині об'єктива коліматора встановлена регульована щілина, що освітлюється монохроматичним світлом. Автоколімаційна окуляр 15 є змінним.

Відлікова система приладу складається з освітлювальної та проекційної частин. Лампочка 1 через зелений світлофільтр і призму 4 висвітлює ділянку лімба 3. Освітлені штрихи лімба проектується об'єктивом 5 через призми 2 і 6 на діаметрально протилежну ділянку лімба в перевернутому вигляді.

Коліматор 18 і зорова труба 17 мають однакові телеоб'єктиви, що фокусуються переміщенням негативних компонентів 16 і 19.

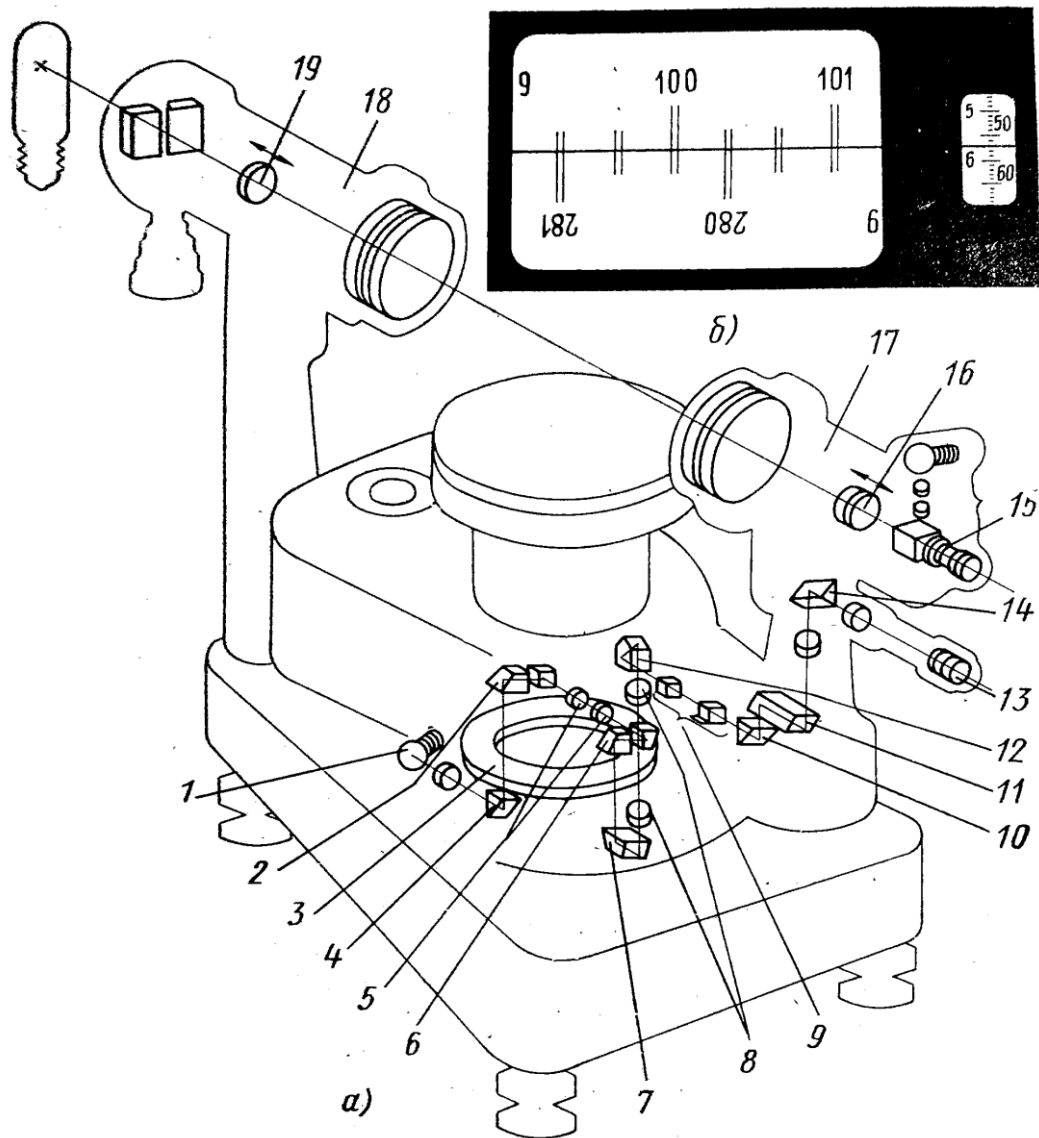


Рисунок 22 – Гоніометр ГС-10: *а* – принципова оптична схема; *б* – поле зору

Об'єктив 8 через призми 7, 12 і 10 дає зображення поруч розташованих штрихів обох ділянок лімба в площині діафрагми поля зору, нанесеної на вихідній грані призми 10, і через призми 11 і 14 розглядається у відліковий мікроскоп 13. Між призмами 12 і 10 встановлені дві пари клинів оптичного компенсатора 9.

Клини розташовані вершинами в протилежні сторони так, що через один з них проходить зворотне зображення першої ділянки лімба, а через інший – пряме зображення другої ділянки.

При переміщенні клинів уздовж оптичної осі зображення ділянок лімба зміщуються поперек оптичної осі і в протилежних напрямках. Кожне наступне поєднання штрихів обох зображень лімба відбувається при повороті лімба на 10', хоча він розділений на 20-хвилинні інтервали, що пояснюється рухом обох зображень в різні боки з однаковою швидкістю. Шкала компенсатора нанесена на скляну пластинку і має 600 поділок. Вона механічно пов'язана з одним з клинів, причому взаємному переміщенню зображень лімба на 10' відповідає повне переміщення шкали. Таким чином, ціна одного поділу компенсатора дорівнює 1".

Зображення поділів лімба і шкала компенсатора розташовані в одній площині і розглядаються через відліковий мікроскоп (рис. 22, б). Число градусів визначається за прямим зображенням лімба. Число десятків хвилин визначається за кількістю інтервалів між оцифрованими градусними поділами, які відрізняються на 180° (в даному прикладі 100° і 280°). Ціна поділки дорівнює $10'$. Одиниці хвилин і секунди відраховуються за шкалою компенсатора і рисці в малому вікні. На рис. 8.24, б повний відлік становить $100^\circ 15' 57''$.

Вимірювання кутів на гоніометрах виконують колімаційним (рис. 23, а) і автоколімаційним (рис. 23, б) методами.

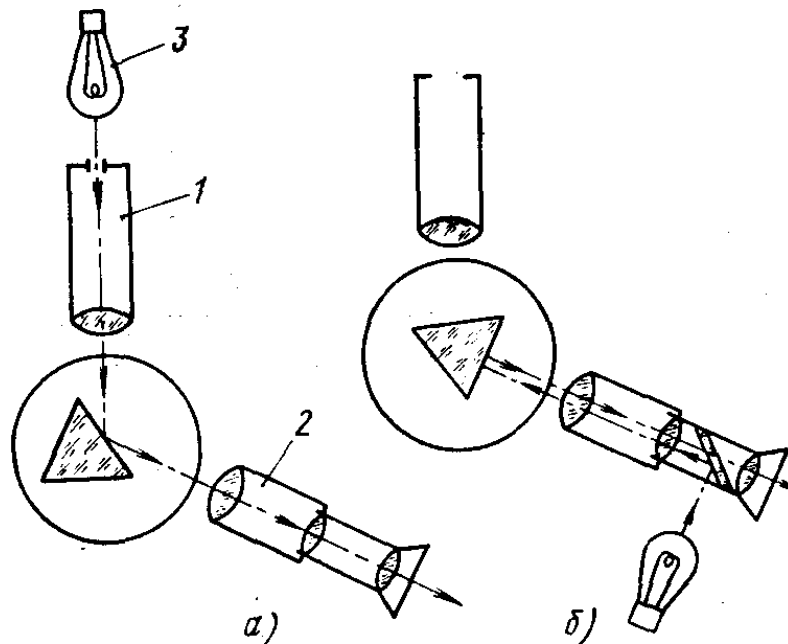


Рисунок 23 – Вимірювання кутів на гоніометрі:
а – колімаційні; б – автоколімаційні

У першому випадку столик з призмою повернений так, щоб паралельний пучок променів, що виходить з коліматора 1, відбившись від грані призми, потрапляє в зорову трубу 2. Зображення щілини коліматора поєднують з перехрестям зорової труби і беруть перший відлік по лімбі. Потім столик з лімбом повертають до суміщення зображення щілини з перехрестям після відбиття світла від одної грані призми. Різниця відліків дорівнює куту повороту лімба β . Вимірюваний кут $\alpha = 180^\circ - \beta$.

У другому випадку коліматор не використовується, а на зорову трубу встановлюється автоколімаційний окуляр. Столик з призмою повертають так, щоб автоколімаційне зображення марки збіглося з перехрестям окуляра, тобто щоб грань призми була нормальна до падаючого пучка. Послідовна установка двох граней в зазначене положення дає різницю відліків, рівну куту β . Кут призми, що вимірюється $\alpha = 180^\circ - \beta$.

Можливі інші способи вимірювання, пов'язані з тим, що зорова труба або автоколіматор можуть повертатися навколо столу, повертаючи відлікову систему гоніометра навколо лімба.

7.2 Оптична ділильна головка

Оптична ділильна головка широко використовується в машинобудуванні як для вимірювання кутів, так і для точного повороту виробу на певний кут або для поділу його на певне число частин.

Оптична ділильна головка складається із:

- циліндричного корпусу зі шпінделем, жорстко пов'язаним зі скляним лімбом;
- освітлювальної частини;
- відлікового мікроскопу.

Оптична ділильна головка з екраном має додаткову проєкційну систему.

Принцип дії приладу заснований на повороті шпінделя спільно з закріпленим на ньому скляним лімбом (диском з поділами). З шпінделем скріплюється об'єкт, що досліджується, величина повороту якого відраховується по лімбу за допомогою мікроскопу.

Головка має кутомірну оптичну шкалу з подвійним оцифруванням, прямим і зворотнім, що дозволяє вести відлік при протилежних напрямках обертання шпінделя. Принципова схема **оптичної ділильної головки (ОДГ-А)** зображена на рис. 24.

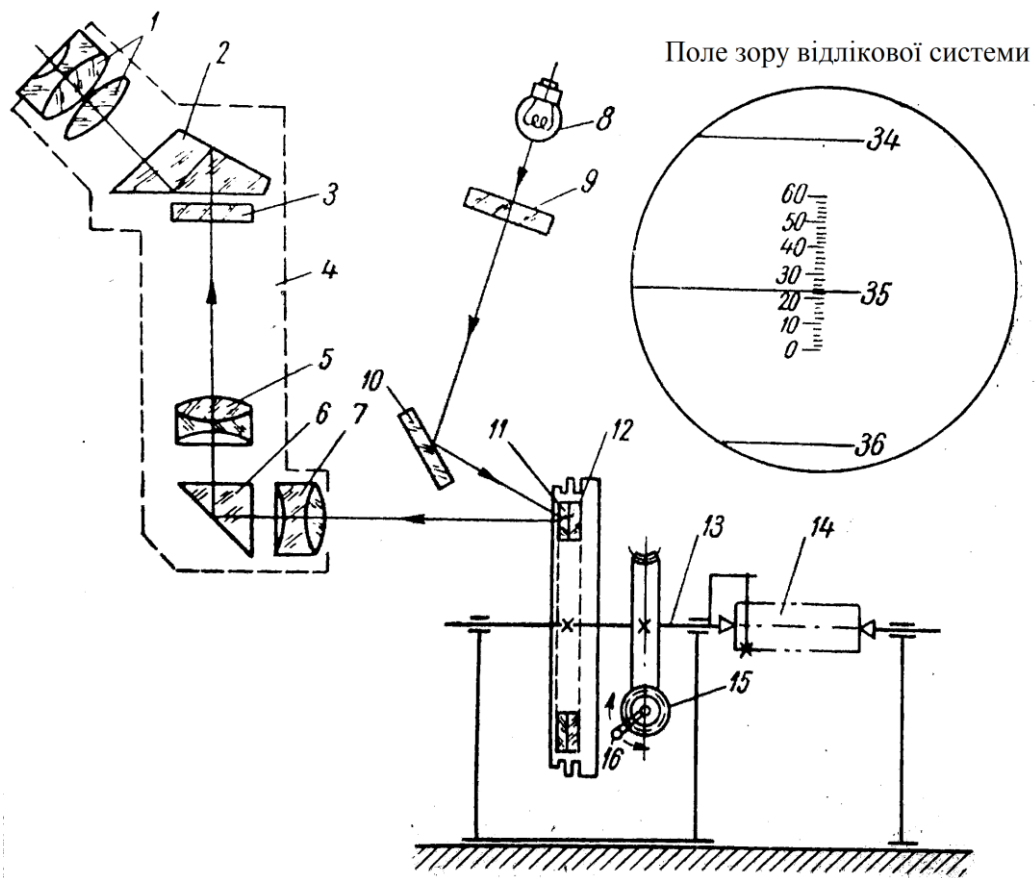


Рисунок 24 – Принципова схема оптичної ділильної головки ОДГ-А

Спеціальний механізм зі шторкою закриває одну з оцифровок, в залежності від напрямку обертання. Дослідний об'єктив 14 кріпиться на шпинделі 13, який приводиться в обертання черв'ячною парою 15 за допомогою рукоятки 16. Черв'ячна пара є лише транспортуючим механізмом і на точність вимірювання не впливає. На

осі шпінделя жорстко закріплюється скляний лімб 11 (з градусними поділами) і дзеркало 12. Лімб висвітлюється лампочкою 8. Світло від лампочки 8 через зелений світлофільтр 9 і дзеркало 10 падає на лімб і, відбившись від дзеркала, направляється у відліковий мікроскоп 4. Двокомпонентний об'єктив 5 і 7 з призмою 6 проектує зображення градусних поділів лімба в площину сітки 3 з хвилинною шкалою; за допомогою останньої виконується відлік через призму 2 і окуляр 1. Відлік на рисунку $35^{\circ} 23' 40''$ (на око відраховується третина хвилинного розподілу).

7.3 Автоколіматори

Автоколімаційними – називаються системи, які проектують зображення об'єкта за допомогою відбиваючої поверхні в площину самого об'єкта.

Принцип автоколімації полягає в наступному. У фокальній площині M об'єктива O поміщається марка, що світиться A (див. рис. 8.25).

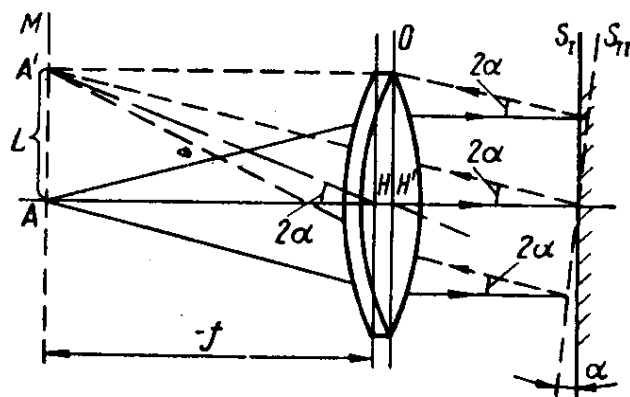


Рисунок 25 – Автоколімаційний хід променів

Промені, що вийшли з цієї точки, пройшовши об'єктив, підуть паралельним пучком і потраплять на плоске дзеркало S .

Якщо дзеркало розташоване перпендикулярно осі пучка (положення S_I , то промені після віддзеркалення від нього повернуться назад тим самим шляхом і, пройшовши об'єктив, утворюють автоколімаційне зображення, що збігається з маркою, що світиться A .

Якщо дзеркало займе положення S_{II} під кутом α до осі падаючого на нього пучка променів, то відбитий пучок піде назад під кутом 2α до початкового стану і зображення точки A утворюється в точці A' на відстані l . Якщо в фокальній площині об'єктива O помістити шкалу, то знаючи фокусну відстань об'єктива, можна обчислити кут 2α .

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{AA'}{f_{об'}}$$

До автоколімаційних пристроїв відносяться такі оптичні системи, які проектують зображення окулярної сітки за допомогою відбиваючої поверхні в площину самої окулярної сітки, що підсвічується.

Автоколімаційні системи двох типів:

- **Автоколімаційна зорова труба** або **автоколіматори** (падаючі на відбивну площину і відбиті від неї пучки променів є паралельними);
- **Автоколімаційна мікроскопи** (пучки променів не є паралельними).

Автоколімаційна зорова труба – зорова труба зі **автоколімаційним** окуляром.

Три системи автоколімаційних окулярів:

- **система Аббе,**
- **система Гауса,**
- **окуляр з кубиком.**

7.3.1 Автоколіматор з окуляром Аббе

У фокальній площині об'єктива 1 (рис. 26) встановлена сітка 2, склеєна з призмою 3 прямокутного перерізу зі скосом під кутом 45° . На сітці 2 награвані у горизонтальному і вертикальному напрямках штрихи з цифрами поділу сітки виражені в секундах або хвилинах.

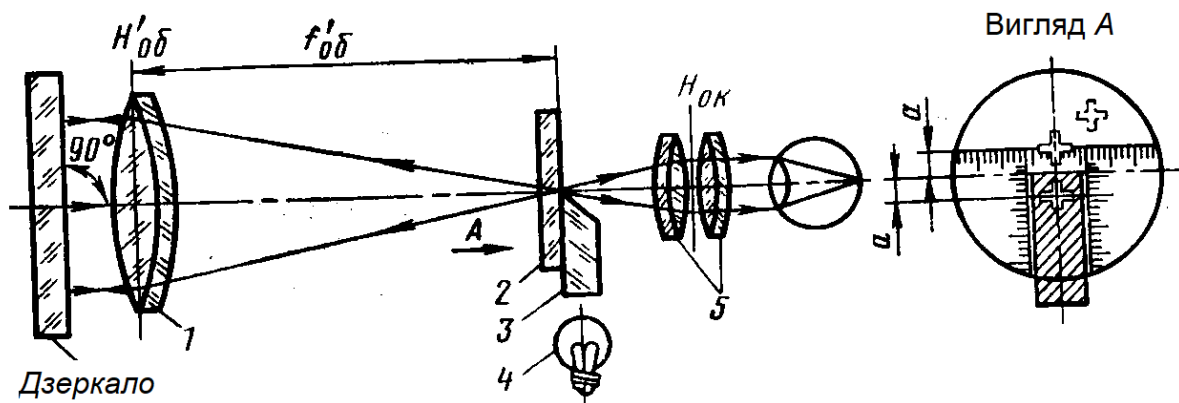


Рисунок 26 – Оптична схема автоколіматора з окуляром Аббе

У площині склеювання призма 3 покрита шаром металу. В цього шару прорізаний прозорий хрестик, висота якого укладається в проекції похилої грані призми 3. Зовнішні межі цієї призми, крім торця, покриті чорним матовим лаком. В систему входить лампочка підсвічування сітки 4 і окуляр 5.

Якщо дзеркало перед об'єктивом встановлено строго перпендикулярно оптичній осі, то зображення прозорого хреста зміщене від геометричного центру сітки дотори на таку ж величину a , на яку зміщений сам хрест донизу. Це положення зображення хреста прийнято за початкове (нульове). При інших положеннях дзеркала зображення хреста зміщене щодо нуля (показано пунктиром).

Сітка в усіх автоколіматорах розраховується за формулою:

$$l = f' \cdot \operatorname{tg} \beta,$$

де $\beta/2$ – кут повороту дзеркала; β – відповідний кут нахилу відбитого паралельного пучка.

Переваги:

- велика світлосила. Втрати яскравості всього 15...20% (окуляр Аббе рекомендується застосовувати для отримання автоколімаційного відблиску від слабо відбиваючих поверхонь, а також від поверхонь малих розмірів (значно менших діаметра об'єктива).

Недолік:

- екранування частини поля зору призмою підсвічування.

7.3.2 Автоколіматори з окуляром Гауса

Автоколіматор (рис. 27) складається з об'єктива 1, сітки з перехрестям і поділами 2, встановленої в фокальній площині об'єктива, напівпрозорої плоскопаралельної пластинки 3, встановленої до оптичної осі під кутом 45° , окуляра 5 і освітлювача 4.

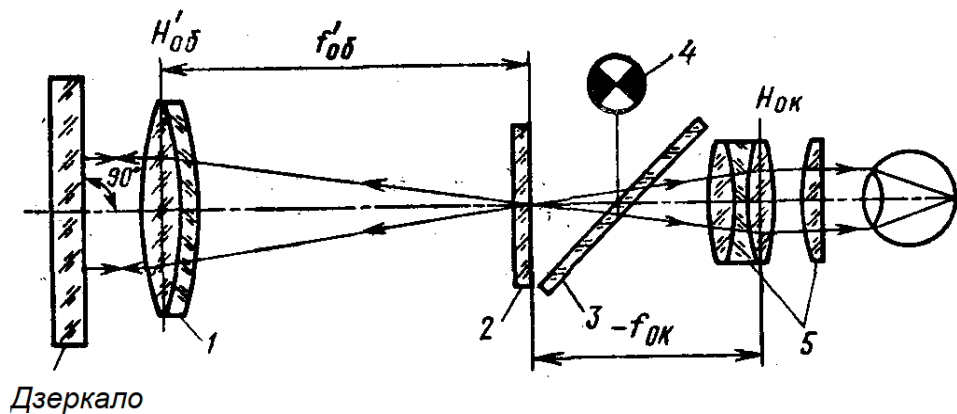


Рисунок 27 – Оптична схема автоколіматора з окуляром Гауса

Перевага:

- незатемнення поля зору.

Недоліки:

- велика втрата яскравості (55...80%);
- присутність сторонніх відблисків, що вносяться похилою пластинкою і неробочою гранню сітки;
- довгофокусність окуляра;
- аберації, що вносяться похилою пластинкою (астигматизм, кома).

Вплив відблисків зменшують застосуванням компенсаційного окуляра. З цією ж метою скляну сітку замінюють простим перехрестям ниток товщиною 0,06...0,08 мм, товщину напівпрозорої пластинки доводять до 0,2...0,25 мм, внутрішні поверхні труби і оправ роблять чорними та матовими.

Довгофокусний окуляр Гауса застосовується тоді, коли сітка 2 має великі мінімальні поділки і коли немає необхідності у великому збільшенні автоколіматора.

7.3.3 Автоколіматори з окуляром з кубиком і двома сітками

Автоколліматор (рис. 28) складається з об'єктива 1, світлоподільного кубика 2, склеєної з двох прямокутних призм, причому в площині склеювання одна з гіпотенузних граней напівпрозора (тонкий шар алюмінію). За кубиком в фокальній площині об'єктива встановлена сітка 3 з перехрестям і полілками, за сіткою, знаходиться окуляр 4.

Між освітлювачем 6 і кубиком встановлена в фокальній площині об'єктива друга сітка 5. На цій сітці зроблений прозорий хрест на шарі алюмінію.

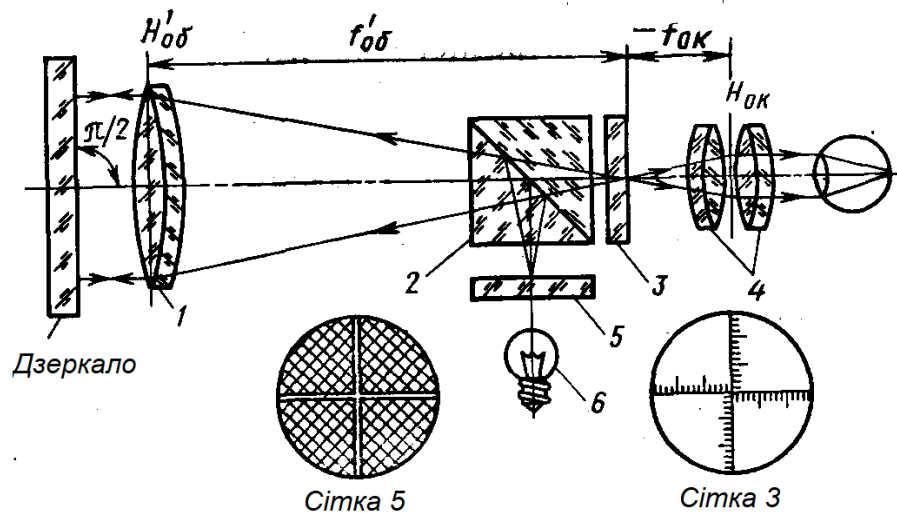


Рисунок 28 – Оптична схема автоколіматора з окуляром з призмою-куб

Переваги: незатемнене поля зору і короткий фокус окуляра, що дає можливість отримати великі збільшення у автоколіматора, і особливо високу точність вимірювання.

Недоліки: значні втрати яскравості (80...85%) і складність юстування двох сіток, механічні і температурні деформації.

7.4 Автоколімаційний мікроскоп

Автоколімаційний мікроскоп (рис. 29) проектує в простір предметів точку, що світиться (діафрагму, міру, перехрестя). Зображення цієї точки розглядається через цей же мікроскоп.

Світло від лампочки 1 через конденсор 2 освітлює точкову діафрагму 3, зображення якої через напівпрозору пластинку 5 і об'єктив 6 проектується в точку 7. Зображення точки, що світиться 7 і її автоколімаційне зображення, утворене поверхнею 8, спостерігається в окуляр 4.

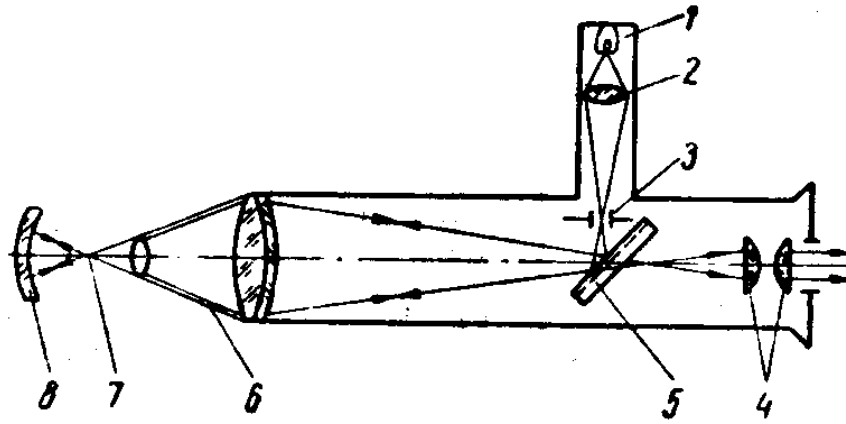


Рисунок 29 – Оптична схема автоколімаційного мікроскопа

Такий мікроскоп застосовується для дослідження якості сферичних поверхонь, вимірювання радіусів кривизни лінз, а також для різних юстування оптико-механічних приладів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кулагин С. В., Гуменюк А. С., Дикарев В. Н., Зубарев В. Е., Лебедев Е. Н., Мосягин Г. М. Оптико-механические приборы. – М.: Машиностроение, 1984. – 352 с.
2. Гвоздева Н. П., Дитева Г. И. Оптико–механические контрольно-измерительные и лабораторные приборы. 1972. – 143 с.
3. Бабушкин С. Г., Беркова М. Г., Гольдин К. Р., Крупп Н. Я., Муниц К. А., Сухопаров С. А., Тарасов К. И. Оптико-механические приборы. – М.: Машиностроение, 1965. – 363 с.
4. Кулагин С. В., Дикарев В. Н., Мосягин Г. М., Лебедев Е. Н., Зубарев В. Е., Гоменюк А. С. Оптико-механические приборы. – М.: Машиностроение, 1975. – 271 с.
5. Крупп Н. Я. Оптико-механические измерительные приборы. – М.-Л.: Машгиз, 1962. – 274 с.
6. Коломийцов Ю. В., Духопел И. И., Инюшин А. И., Артемьев И. В. Оптические приборы для измерения линейных и угловых величин в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1964. – 254 с.
7. Оптические приборы в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение, 1974. – 238 с.