

złożone. Toteż dziś istnieje tendencja uproszczenia przyrządów, opartych na wszelkiego rodzaju mechanizmach precyzyjnych, odtwarzających dane profile. Nieocenione usługi pod tym względem daje metoda czujnikowa. Polega ona na tem, że pewien punkt przyrządu przesuwają ręcznie po wzorcu, zaś sprzężony z nim guzik czujnika po sprawdzanym przedmiocie, np. po płaskim szablonie, umieszczonym nad zasadniczym wzorcem.

ROZDZIAŁ V

WIADOMOŚCI Z OPTYKI GEOMETRYCZNEJ

29. METODY OPTYCZNE SPRAWDZANIA PROFILÓW. Jakkolwiek pomiary według metod optyki geometrycznej były znane i stosowane oddawna w laboratoriach fizycznych i innych, to jednak wprowadzenie ich do techniki jest sprawą lat ostatnich. Zalety metod optycznych zostały szybko ocenione w praktyce. W wielu razach dają one możliwość ominięcia wyrobu kosztownych i szybko zużywających się wzorców profilowych. Pomiary trwają krótko i są bezpośrednie. Zwłaszcza sprawdzanie profilów wszelkiego rodzaju, jak kół zębatych, zębów frezów profilowych, gwintów, części kształtowych przy wyrobie broni i amunicji, nadaje się znakomicie do stosowania metod optycznych.

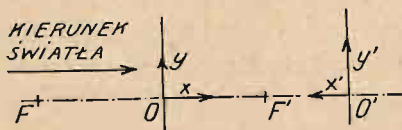
W przyrządach metrologicznych znajdując zastosowanie prawie wszystkie typowe narzędzia optyczne w rodzaju lupy, mikroskopu, obiektywów projekcyjnych, lunetek obserwacyjnych. Ze względu na specjalne cele, którym służą one w zagadnieniach metrologicznych, wprowadzono do nich zmiany, a raczej przystosowano je do tych celów. Najwięcej zastosowań znajduje przytem mikroskop i krótkoogniskowe obiektywy fotograficzne. Temi narzędziami będziemy się też najwięcej zajmowali. Należy zaznaczyć, że profile nie płaskie, jak np. śruby, nie zawsze dadzą się sprawdzać zapomocą metod optycznych, i z tego stanu rzeczy należy sobie zdawać sprawę. Obrazy optyczne przedmiotów mierzonych i porównywanych muszą być możliwie wierne, czyli proporcjonalnie odwzorowane, pozatem znacznie powiększone, jasne i wyraźne. Wymagania, stawiane dokładności wykonania profilów gwintów, czy kół zębatych, są wysokie, i musimy stosować powiększenia, wynoszące 50 i więcej razy. Niekiedy jest to rzeczą niemożliwą do osiągnięcia. Przy wyborze układu optycznego należy postępować ostrożnie i uwzględniać jedynie te układy, w których usunięto w dostatecznym stopniu różne błędy, o których będzie mowa poniżej.

W narzędziach optycznych mamy do czynienia, można powiedzieć, wyłącznie z układami, posiadającymi oś symetrii, czyli z układami wycentrowanymi. Tworzą je powierzchnie obrotowe, posiadające wspólną oś.

Najczęściej są to odcinki powierzchni kulistych, których środki leżą na wspólnej osi. W dalszym ciągu będziemy się zajmowali jedynie tylko takimi układami powierzchni kulistych.

Wobec osiowej symetrii omawianego układu obraz S' punktu świecącego S musi się znajdować w płaszczyźnie, wyznaczonej przez oś układu i punkt S . Zagadnienia odwzorowania optycznego możemy odnieść do tej płaszczyzny osiowej i w niej ustalić osie współrzędnych punktu świecącego x, y i jego obrazu x', y' . Przyjmujemy mianowicie, że światło jest skierowane od strony lewej ku prawej, że na osi symetrii znajdują się początki osi współrzędnych O i O' , przyczem odległość OO' jest wybrana dowolnie. Dodatnie odcięte x punktu świecącego S odkładane są w prawo od odnośnego początku osi współrzędnych O , zaś odcięte x' w lewo od O' (rys. 96). Dodatnie rzędne y i y' są odkładane do góry.

Rozpatrywanie układu wycentrowanych powierzchni kulistych jest bardzo ułatwione, jak nas poucza o tem optyka geometryczna ¹⁾, jeśli wprowadzimy pojęcie t. zw. punktów kardynalnych. Elementarnym przykładem takich punktów będzie środek i ogniska pojedynczej cienkiej soczewki. Do pojęcia punktów kardynalnych dochodzimy z pewnych założeń geometrycznych, przyjmując mianowicie określone sposoby odwzoro-



Rys. 96

wywania punktów przestrzeni przedmiotowej w przestrzeni obrazowej. Zakładamy więc, że jeśli punkty świecące w przestrzeni przedmiotowej tworzą płaszczyznę, to i obrazy tych punktów w przestrzeni obrazowej utworzą również płaszczyznę. Jest to t. zw. warunek stygmatyzmu. Warunek ten sprawdza się nawet dla złożonych układów powierzchni wycentrowanych, jeśli ograniczymy się do rozpatrywania wyłącznie promieni środkowych, czyli tworzących bardzo małe kąty z osią symetrii układu.

Odwzorowanie, czyniące zadość warunkowi stygmatyzmu wycentrowanego układu optycznego dla określonej płaszczyzny przedmiotowej, wyrazi się w postaci wzorów linjowych

$$X' = \frac{a_1 X + b_1 Y + d_1}{a X + b Y + d} \quad \text{ i } \quad Y' = \frac{a_2 X + b_2 Y + d_2}{a X + b Y + d}$$

¹⁾ Zainteresowanemu czytelnikowi polecamy, poza krótkim działem odnośnym w „Zasadach fizyki” Witkowskiego, pięknie i metodycznie opracowany podręcznik P. Drude: Lehrbuch der Optik. Lipsk. Hirzel, lub w przekładzie francuskim — P. Drude: Précis d'optique. Paryż. Gautier-Villars. 1911. Obszerny wykład, zawierający wiele materiału doświadczonego, znaleźć można u Lummer'a: Optik, w czwartym tomie podręcznika fizyki Müller-Pouillet'a. Brunświk. Vieweg. Wiele szczegółów zawiera krótka monografia W. Scheffer'a: Wirkungsweise und Gebrauch des Mikroskopes. Lipsk. Teubner.

przyczem dla ogólności oznaczyliśmy przez X, Y współrzędne punktu świecącego, zaś przez X', Y' punktu obrazowego. Wzory te upraszczają się same, dzięki symetryczności układu względem osi. Tak, gdy Y zmienia znak, X' pozostaje stałe, skąd wynika, że $b_1 = b = 0$. Podobnie z równoczesnej zmiany znaku Y i Y' wynika, że $a_2 = d_2 = 0$. Otrzymujemy wzory uproszczone

$$\begin{array}{l|l} X' = \frac{a_1 X + d_1}{a X + d} & X = \frac{d X' - d_1}{a_1 - a X'} \\ Y = \frac{b_2 Y}{a X + d} & Y = \frac{a_1 d - a d'}{b_2} \cdot \frac{Y'}{a_1 - a X'} \end{array}$$

Pozostaje pięć stałych dowolnych. Ponieważ obchodzą nas tylko ich wzajemne stosunki, przeto możemy powiedzieć, że układ wycentrowany jest w ogólności wyznaczony przez cztery charakterystyczne wielkości.

Ostatnie wzory dają nam możność wyznaczenia równań płaszczyzn ogniskowych:

Przedmiotowa płaszczyzna ogniskowa $F \dots a X + d = 0$

Obrazowa płaszczyzna ogniskowa $F' \dots a X' - a_1 = 0$

Te dwie płaszczyzny ogniskowe przecinają oś w punktach F i F' , które są ogniskami głównymi układu. Przenosimy do nich początki osi współrzędnych, stosując następujące przekształcenia

$$x = X + \frac{d}{a}, \quad y = Y$$

$$x' = X' - \frac{a_1}{a}, \quad y' = Y'$$

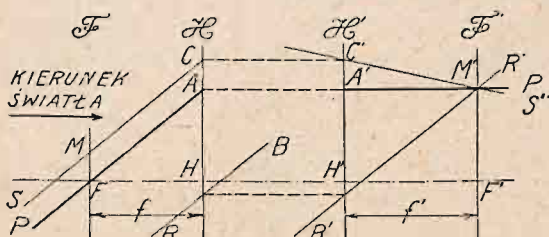
Zakładając $f = b_2/a$, $f' = \frac{a d_1 - a_1 d}{a b_2}$, otrzymamy t. zw. wzory Newton'a, na których opiera się teoria geometryczna układów wycentrowanych:

$$\begin{array}{l} x x' = f f' \\ \frac{y'}{y} = \frac{f}{x} = \frac{x'}{f'} \end{array}$$

Stosunek y'/y otrzymał nazwę powiększenia poprzecznego, lub krócej powiększenia. Zależy ono od x i f i nie zależy od y . Jest ono równe jedności dla $x = f$ lub $x' = f'$. Nazywamy płaszczyznami głównymi H i H' płaszczyzny, znajdujące się w odległości f i f' od F i F' . Odpowiednio otrzymujemy na osi dwa nowe punkty kardynalne H i H' .

Płaszczyzny główne posiadają tę własność, że każdemu punktowi A , znajdującemu się na jednej z nich w odległości m od osi, odpowiada na drugiej płaszczyźnie punkt A' , sprzężony z A w tej samej odległości m

od osi. Płaszczyzny ogniskowe posiadają natomiast tę własność, że każdemu z ich punktów odpowiadają obrazy w nieskończoności. Promienie, wychodzące z dowolnego punktu płaszczyzny F_1 , dają w przestrzeni obrazowej pęk promieni równoległych (rys. 97).



Rys. 97

Wielkości $f = HF$ i $f' = H'F'$ nazywamy głównymi odległościami ogniskowymi przestrzeni przedmiotowej i obrazowej. Ogniskowa f jest dodatnia, jeśli promień światła spotyka

naprzód F , a potem H , odległość f' jest dodatnia, jeśli naodwrot promień spotyka naprzód H' , a potem F' . Na rys. 97 obie ogniskowe są dodatnie.

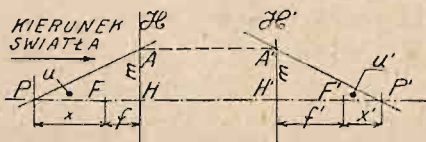
Rozpatrzmy obecnie dwa promienie sprzężone PA i $P'A'$ (rys. 98). Mamy

$$\operatorname{tang} u = \frac{AH}{PH} = \frac{m}{f-x} \quad \text{oraz} \quad \operatorname{tang} u' = \frac{A'H'}{P'H'} = \frac{m}{f'-x'},$$

skąd otrzymujemy

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tang} u'}{\operatorname{tang} u} = \frac{f-x}{f'-x'} = -\frac{x}{f'} = -\frac{f}{x'}$$

Stosunek Γ nazywamy stosunkiem zbieżności lub powiększeniem kątowym. Z równań Newtona i omawianego wzoru otrzymujemy t. zw. zależność Lagrange'a



Rys. 98

$$\frac{y' \operatorname{tang} u'}{y \operatorname{tang} u} = -\frac{f}{f'},$$

która wyraża analitycznie warunek stygmatyzmu układu wycelowanego.

Jeśli oznaczymy odcinek PH przez $p = f - x$, zaś $P'H'$ przez $p' = f' - x'$, to z pierwszego wzoru Newtona otrzymamy zależność

$$\frac{f}{p} + \frac{f'}{p'} = 1$$

30. ZESPÓŁ DWÓCH WSPÓŁOSIOWYCH UKŁADÓW WYCEN-TROWANYCH. Łatwo wykazać, że dwa współosiowe układy wycen-trowane, umieszczone jeden za drugim, są równoważne jednemu zastępczemu układowi wycelowanemu, którego punkty kardynalne łatwo wyznaczyć. Metodę powyższą można uogólnić dla dowolnej liczby układów.

Oznaczmy przez f i f' główne ogniskowe układu wypadkowego, zaś przez f_1 i f'_1 , oraz f_2 i f'_2 ogniskowe obu układów pierwotnych. Na-

zwijmy odstępem odcinek $F'_1 F_2 = \Delta$ pomiędzy pierwszym ogniskiem obrazowym i drugim ogniskiem przedmiotowym, uważając go za dodatni, jeśli F'_1 znajduje się na lewo od F_2 (rys. 99).

Promień padający SA_1 daje po przejściu przez układ pierwszy promień $A'_1 F'_1 A_2$, przechodzący przez ognisko F'_1 , a potem po przejściu przez układ drugi promień $A'_2 F' S'$, który przecina oś w punkcie F' , ognisku obrazowym układu wypadkowego. Punkty F'_1 i F' mogą być uważane za sprzężone względem układu drugiego. Wzór Newtona daje nam bezpośrednio

$$F'_2 F' = \frac{f_2 f'_2}{\Delta}$$

Przecięcie $F' S'$ z promieniem $S_2 A_1$ przedłużonym wyznacza położenie głównej płaszczyzny obrazowej H' układu wypadkowego, a zarazem odległość ogniskową $f' = F' H'$. Konstrukcja wykazuje, że f' jest ujemne, gdy Δ jest dodatnie.

Odległość ogniskową f' możemy wyprowadzić bezpośrednio ze wzorów $y = f'_1 \tan u_1 = f' \tan u'$ oraz wzoru $\frac{\tan u'}{\tan u_1} = -\frac{\Delta}{f'_2}$, z czego wynika, że

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta}$$

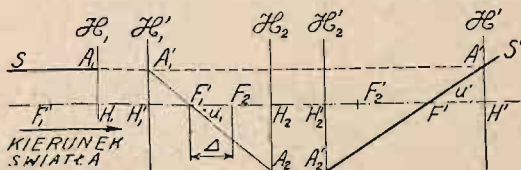
Podobnie, rozważając w przestrzeni obrazowej bieg promienia równoległego do osi, otrzymujemy dwa analogiczne wzory:

$$FF_1 = \frac{f_1 f'_1}{\Delta}, \text{ oraz } f = -\frac{f_1 f_2}{\Delta}$$

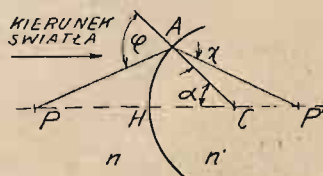
Dotychczas rozpatrywaliśmy układy wycentrowane wyłącznie z formalnego punktu widzenia, obecnie omówimy, jak wyznaczyć kardynalne punkty układu na podstawie wymiarów i promieni krzywizny danej soczewki, czy też układu soczewek. W tym celu rozpatrzmy załamanie się centralnej wiązki promieni w dioptrze kulistym (rys. 100).

Niech promień PA w ośrodku z współczynnikiem załamania n pada na powierzchnię kulistą i po załamaniu się idzie w kierunku AP' . Nowy ośrodek posiada przytem wskaźnik załamania $n' > n$. Niech C jest środkiem kuli, zaś r jej promieniem. Z trójkątów PAC i $P'AC$ mamy

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} = \frac{PH + r}{PA} \text{ oraz } \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} = \frac{HP' - r}{P'A}$$



Rys. 99



Rys. 100

Dzieląc oba wyrazy tych zależności i uwzględniając prawo załamania Kartezjusza, otrzymujemy

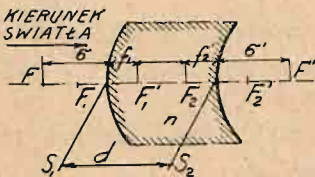
$$\frac{\sin \varphi}{\sin \chi} = \frac{n}{n'} = \frac{PH + r}{P'H - r} \cdot \frac{P'A}{PA}$$

Jeśli A znajduje się bardzo blisko H , to możemy przyjąć, że $p = PH = PA$ oraz $p' = P'H = P'A$, i poprzednia zależność po przekształceniu da nam ostatecznie

$$\frac{n}{p} + \frac{n'}{p'} = \frac{n' - n}{r}$$

Wzór powyższy jest tem słuszniejszy, im promień padający jest bardziej centralny. Przyjmujemy zatem, że r jest dodatnie, jeśli C znajduje się na prawo od H , następnie p jest dodatnie, jeśli P jest na lewo od H , wreszcie p' jest ujemne, jeśli P' jest na prawo od H . Każdemu punktowi P odpowiada punkt sprzężony P' . Porównyując wzór ostatni z ostatnim wzorem z ustępu poprzedzającego, wyznaczamy z łatwością odległości ogniskowe układu

$$f = r \frac{n}{n' - n} \quad \text{oraz} \quad f' = r \frac{n'}{n' - n}$$



Rys. 101

przyczem obie główne płaszczyzny zbiegają się z płaszczyzną styczną w wierzchołku H kuli.

Obecnie możemy przystąpić do zastosowania wzorów dla zespołu współosiowego układów wycentrowanych w przypadku dowolnie grubej soczewki (rys. 101). Soczewka o wskaźniku załamania n umieszczona jest w powietrzu, którego współczynnik wynosi 1. Grubość soczewki wynosi d . Ogniskowe dioptrów wynoszą f_1, f'_1, f_2, f'_2 ; układu wypadkowego f i f' . Odstęp $\Delta = F'_1 F_2 = d - f'_1 - f_2$. Mamy

$$f_1 = r_1 \frac{1}{n - 1}; \quad f'_1 = r_1 \frac{n}{n - 1}; \quad f_2 = r_2 \frac{n}{1 - n}; \quad f'_2 = r_2 \frac{1}{1 - n}$$

Na mocy wzorów dla zespołu układów współosiowych otrzymujemy

$$f = f' = \frac{n}{n - 1} \cdot \frac{r_1 r_2}{d(n - 1) - n(r_1 - r_2)}$$

Położenie ognisk F i F' wyznaczają wzory:

$$\sigma = FS_1 = FF_1 + f_1 = \frac{r_1}{n - 1} \cdot \frac{d(n - 1) + nr_2}{d(n - 1) - n(r_1 - r_2)}$$

$$\sigma' = FS_2 = F'_2 F' + f'_2 = \frac{r_2}{n - 1} \cdot \frac{-d(n - 1) + nr_1}{d(n - 1) - n(r_1 - r_2)}$$

Jeśli oznaczymy przez h odległość głównej płaszczyzny przedmiotowej H

od wierzchołka S_1 , zaś przez h' odległość głównej płaszczyzny H' od wierzchołka S_2 , to otrzymamy z łatwością:

$$h = \sigma - f = \frac{r_1 d}{d(n-1) - n(r_1 - r_2)}$$

$$h' = \sigma' - f' = \frac{-r_2 d}{d(n-1) - n(r_1 - r_2)}$$

Odległość pomiędzy dwoma płaszczyznami głównymi wynosi:

$$p = d + h + h' = d(n-1) \cdot \frac{d - (r_1 - r_2)}{d(n-1) - n(r_1 - r_2)}$$

Dla cienkich soczewek przepada wyraz $d(n-1)$, i wzór się upraszcza

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Odległość p pomiędzy dwoma płaszczyznami głównymi staje się wówczas niezależną od krzywizn. Dla $n = 1,5$ mamy $p = d/3$.

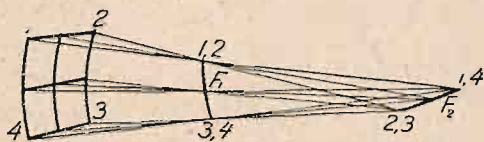
Do wyznaczania punktów kardynalnych układu soczewek wycenrowanych podane metody nadają się najzupełniej. Musimy tu jednak zauważyć, że otrzymane schematy układów posiadają znaczenie raczej formalne, ułatwiające rozważania całości, jednak, praktycznie biorąc, poprzestawanie tylko na układach, w których nieskończenie cienkie wiązki promieni bardzo mało są odchyłone od osi, pozostawałoby bez znaczenia. Jeśli wiązka promieni ulegnie znaczniejszemu odchyleniu, co zawsze zdarza się w zagadnieniach praktycznych, to warunek stygmatyzmu przestaje być zachowany i powstaje szereg błędów, które należy omówić.

31. BŁĘDY UKŁADÓW OPTYCZNYCH. Dotychczas rozważaliśmy wiązki centralne, które po załamaniu w soczewce dawały obraz punktowy. Inaczej rzecz będzie się przedstawiała, gdy zamiast wiązki centralnej weźmiemy brzegową, lub wogóle nachyloną znacznie względem osi. Teoria ruchu falowego poucza nas, że promienie świetlne, wychodzące z jednego punktu, po odbiciu lub załamaniu przez jakąś powierzchnię, stają się prostopadłe do pewnej rodziny powierzchni równoległych. Twierdzenie powyższe, które zawdzięczamy Malus'owi¹⁾, można uogólnić w sposób następujący. Jeżeli promienie świetlne są prostopadłe do jakiejś powierzchni, to nie tracą tej własności po dowolnej liczbie odbić i załamania.

Wiązka promieni utożsamia się więc z normalami do elementu powierzchni falowej, jednak te normale w ogólności nie przecinają się.

¹⁾ Ścisłe uzasadnienie twierdzenia Malus'a można znaleźć u E. Goursat. Kurs analizy matematycznej. Tom I. Część druga. Geometria różniczkowa. Warszawa, 1917, str. 112.

Z geometrii różniczkowej wiemy, że na każdej powierzchni istnieją dwie krzywe, przecinające się w danym punkcie, i których normale przecinają się: są to linie krzywizny. Rozpatrzmy dwie wiązki płaskie, których



Rys. 102

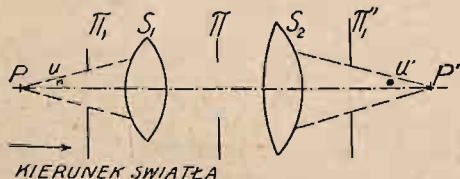
promienie są odpowiednio prostopadłe do odcinków l_1 i l_2 linii krzywizny, przecinających się w danym punkcie powierzchni fali. Te wiązki tworzą obrazy w środkach krzywizny linii l_1 i l_2 . Ogólnie biorąc, te obrazy zajmują różne po-

łożenia w przestrzeni, gdyż krzywizny odcinków l_1 i l_2 nie są równe.

Tym sposobem wiązka promieni, prostopadła do elementu powierzchni fali (rys. 102), nie przecina się w jednym punkcie, a daje w przestrzeni obrazowej dwa odcinki, które nazywamy ogniskowemi: pionową F_1 , łączącą środki krzywizny 1, 2 i 3, 4, oraz poziomą F_2 , łączącą środki krzywizny 2, 3 i 1, 4.

Odległość $F_1 F_2$ daje miarę astygmatyzmu wiązki. Możemy na podstawie praw załamania ustalić astygmatyzm wiązki, padającej pod określonym kątem na powierzchnię kulistą, lub przechodzącej przez soczewkę. Możemy następnie rozszerzyć pojęcia astygmatyzmu soczewki w wypadku już nie wiązki promieni, ale pęku tych wiązek o dużym kącie wierzchołkowym. Zanim te pojęcia ściślej ustalimy, musimy omówić działanie przesłonek (diafragm), które posiadają wielkie znaczenie w układach optycznych i z którymi mamy stale do czynienia w przyrządach projekcyjnych.

Pęki promieni, tworzące obrazy za pośrednictwem układów optycznych, są z natury rzeczy ograniczane bądź przez wielkość soczewek, bądź przez przesłonki. Wybierzmy jakikolwiek punkt przedmiotowy P (rys. 103). Niech każda przesłonka Π da nam obraz Π_1 za pośrednictwem tej części układu optycznego, jaki się znajduje pomiędzy Π a punktem P . Oczy-



Rys. 103

wiście z tych obrazów Π_1 jeden ukaże się względem punktu P pod najmniejszym kątem stożkowym. Odnosny stożek wyznaczy granice stożka świetlnego. Przesłonekę materialną Π nazywamy diafragmą, obraz Π_1 źrenicą wejściową, zaś kąt $2U$, pod jakim ukazuje się źrenica wejściowa

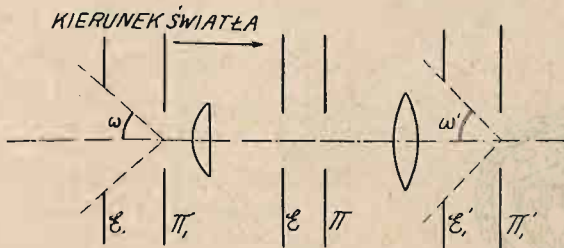
z punktu P , kątem otwarcia układu. Analogicznie otrzymujemy źrenicę wyjściową układu, a kąt $2U'$ nazywamy kątem projekcji układu. Płaszczyznę przedmiotową możemy sobie przedstawić jako nieograniczonej wielkości. Wielkość soczewek i diafragm ogranicza jednak pole widzenia

do pewnego otworu. Jeśli ze środka źrenicy wejściowej zobaczymy pole przedmiotu, ograniczone przez różne materialne przesłonki pod pewnym kątem 2ω , najmniejszym z możliwych, to odpowiedni stożek ogranicza t. zw. pole optyczne, i kąt 2ω nazywamy kątem pola optycznego. W przesłoni obrazowej otrzymujemy podobnie kąt obrazowy $2\omega'$ (rys. 104).

Po daniu zasadniczych określeń pola optycznego¹⁾, które będą nam przydatne przy szczegółowym omawianiu tak niektórych błędów układu optycznego, jak i specjalnie przy rozważaniu układów projekcyjnych, przejdziemy obecnie do scharakteryzowania błędów, wynikających z różnorodnych przyczyn, i sposobów ich usunięcia. Z astygmatyzmu układów soczewkowych wynikają błędy, noszące miano aberacji sferycznej, skrzywienia i zwichrowania obrazu. Z rozszczepiania światła przez soczewki wynikają błędy, noszące nazwę aberacji chromatycznej.

Wyjaśnialiśmy poprzednio, że wiązka, normalna do elementu powierzchni falowej, daje dwie linie ogniskowe pod kątem prostym i, ogólnie biorąc, w dwóch różnych płaszczyznach. Jeśli pod uwagę weźmiemy znaczniejszy odcinek powierzchni falowej, to miejsce geometryczne elementów ogniskowych utworzy powierzchnię dwupowłokową, którą nazywamy powierzchnią palącą albo kaustyką. W układach wycentrowanych jedną z powłok kaustyki jest odcinek osi, zaś drugą pewna określona powierzchnia obrotowa, będąca rozwijalną powierzchnią falową, lub, inaczej mówiąc, obwiednią promieni świetlnych, jak wiadomo, normalnych do tej powierzchni.

Badanie kaustyk jest dla układów soczewkowych zagadnieniem niezmiernie trudnym, i dlatego przy stożkach szerokokątowych poprzestaje się na obliczaniu aberacji sferycznej, podłużnej i poprzecznej. Aberacją podłużną nazywamy odległość pomiędzy dwoma punktami-obrazami dla promieni centralnych i brzegowych. Jeśli punkt przedmiotowy znajduje się w nieskończoności, otrzymujemy główną aberację podłużną, jeśli przytem w rozwinięciu szeregowym, w jakim wyraża się aberacja, zatrzymamy się na pierwszym wyrazie, to otrzymamy t. zw. aberację główną pierwszego rzędu. Z obliczenia aberacji dla różnych soczewek wynika, że soczewka płasko-wypukła daje mniejszą aberację, jeśli strona wypukła



Rys. 104

¹⁾ Ograniczanie pola optycznego za pośrednictwem przesłonek posiada pierwszorzędne znaczenie dla teorii przyrządów optycznych, opracowanej przez Helmholtza, Abbe'go, Czapskiego i t.d. W rozdziale powyższym opieram się na podręczniku: Drude: Précis d'optique.

jest skierowana ku przedmiotom oddalonym; w razie przeciwnym aberracja jest bez porównania większa. Soczewka płasko-wypukła posiada przytem aberrację mało co większą od aberracji minimalnej. Aberrację można usunąć przez dobór szkła i zastąpienie jednej soczewki przez kilka cienkich. Dobierając odpowiedni kształt soczewek, można usunąć aberrację pierwszego a nawet wyższych rzędów dla jednego, a nawet kilku położeń przedmiotu.

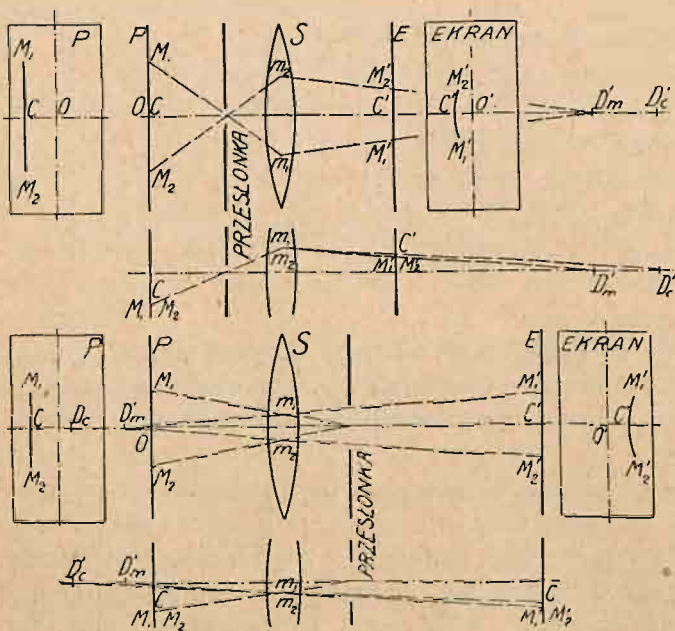


Rys. 105

Z astygmatyzmu wynika krzywizna obrazu płaszczyzny przedmiotowej, wyrażająca się w tem, że obraz tej płaszczyzny odwzorowuje się na pewnej powierzchni krzywej. Zagadnienie wiernego rzutowania i powiększania profilów jest najściślej związane z innym błędem, polegającym na zwichrowaniu obrazu. Ujawnić ten błąd można, tworząc

obraz prawidłowej kraty, zwichrowany w postaci poduszkowej lub baryłkowej (rys. 105).

Niezmierzalnie prosty przykład wyjaśnienia, wskutek czego powstaje zwichrowanie obrazu. Niech S będzie soczewką bardzo cienką (rysunek 106). Przedmiot stanowi linia prosta $M_1 M_2$. Jeśli umieścimy przesłonkę przed soczewką, otrzymamy zwichrowanie baryłkowe, jeśli zaś z tyłu, poduszkowe. Wynika to z po-



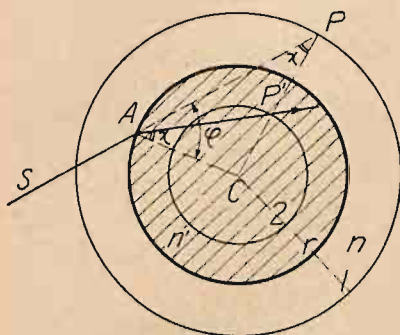
Rys. 106

łożenia punktów przecięcia osi układu przez załamane wiązki centralne CC' i brzegowe $M_1 m_1 M_1'$ oraz $M_2 m_2 M_2'$.

Zasadnicze sposoby usunięcia aberracji chromatycznej są tak powszechnie znane, że pomijamy je w niniejszym skrócie podstaw optyki geometrycznej.

32. ODWZOROWANIE ZAPOMOCĄ ROZWARTYCH PĘKÓW PROMIENI. REGUŁA SINUSÓW. Wyłożenie pobieżne zasad odwzoro-

wania optycznego wskazuje, że warunek stygmatyzmu jest znacznie gorzej spełniany w pękach rozwartych, niż wąskich. Mimo to jednak



Rys. 107

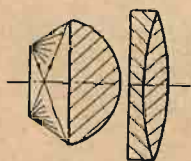
ze względu na odwzorowywanie większych obrazów lub konieczność osiągnięcia dużych powiększeń, właśnie rozwarłe pęki promieni posiadają największe znaczenie w narzędziach optycznych, jak obiektywy fotograficzne i mikroskopy. Rozpatrzmy obecnie, kosztem jakich ograniczeń, zdołamy uzyskać dostatecznie dobre obrazy, zużytkowując pęki rozwarłe.

Niech C (rys. 107) będzie środkiem kuli załamującej światło, której promień $= r$ i wskaźnik załamania n' . Ośrodek otaczający posiada wskaźnik n . Aby zbudować promień załamany dla promienia padającego SA , zatoczmy według pięknej propozycji Weierstrassa dwa koła pomocnicze $r_1 = \frac{n'}{n} r$ oraz $r_2 = \frac{n}{n'} r$, następnie przedłużmy promień SA aż do spotkania w punkcie P i wreszcie połączmy punkt A z punktem P' na promieniu PC . Prosta AP' jest szukanym promieniem załamanym. Z podobieństwa trójkątów APC i $AP'C$ wynika, że kąt $APC =$ kątowi $P'AC = \zeta$, a następnie

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \zeta} = \frac{PC}{AC} = \frac{n'}{n}.$$

Z konstrukcji powyższej wynika, że wszystkie promienie padające, skierowane ku punktowi P , po załamaniu przechodzą przez punkt P' . Na podstawie prawa wzajemności wnioskujemy, że odwrotnie, promienie, wychodzące z P' , zbiegają się w P .

Tak więc na każdym promieniu kuli posiadamy dwa punkty sprzężone P i P' w odległości $r \frac{n'}{n}$ oraz $r \frac{n}{n'}$ od środka, które nazywamy punktami sprzężonymi aplanetycznymi kuli. Są one wolne od aberacji i wskutek tego posiadają wielkie znaczenie dla konstrukcji obiektywów mikroskopowych, w których czołową soczewkę stanowi często półkulista soczewka (rys. 108). Małe elementy powierzchni, znajdujące się w pobliżu jednego z punktów aplanetycznych, mogą być odwzorowane na elemencie w pobliżu drugiego punktu zapomocą dowolnie rozwartego pęku promieni najzupełniej wiernie bez aberacji. We wzorze,

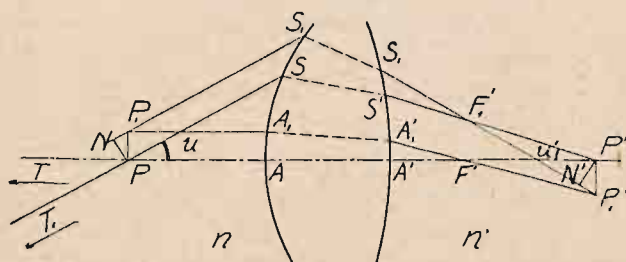


Rys. 108

podanym powyżej, występuje stosunek sinusów, który jest charakterystyczny dla własności sprzężonych punktów aplanetycznych.

Zapytujemy obecnie, jaki warunek musi być spełniony, aby mały element płaszczyzny, prostopadły do osi układu wycelowanego, mógł być odwzorowany punktowo i wiernie zapomocą dowolnie szeroko rozwartego pęka promieni. W jakich warunkach wszystkie promienie, wychodzące z elementu PP_1 , spotkają się po załamaniu w elemencie $P'P_1'$ (rys. 109).

Niech promień PA będzie skierowany wzdłuż osi, zaś inny PS niech tworzy z nim kąt u . Promienie P_1A_1 i P_1S_1 są równoległe do pierwszych,



Rys. 109

niech po załamaniu spotkają się one w punkcie P_1' . Promień sprzężony z P_1A_1 spotyka oś w punkcie F' , ognisku obrazowym układu.

Nazwijmy przez (PAP') drogę optyczną¹⁾ pomiędzy P i P' i przechodzącą przez A , przez

$(PSS'P')$ drogę optyczną, przechodzącą przez S i S' i t. d. Na mocy twierdzenia Fermat'a, że rzeczywista droga optyczna stanowi maximum lub minimum z pośród wszystkich możliwych dróg optycznych, mamy dla punktów sprzężonych

$$(PAP') = (PSS'P') \text{ i } (P_1A_1F'P_1') = (P_1S_1S_1'P_1')$$

skąd

$$(PAP') - (P_1A_1F'P_1') = (PSS'P') - (P_1S_1S_1'P_1').$$

Ponieważ punkt F' jest sprzężony z nieskończenie oddalonym punktem przedmiotowym T , mamy $(TPAF') = (TP_1A_1F')$, skąd znowu

$$(PAF') = (P_1A_1F'),$$

gdyż jest rzeczą oczywistą, że $(TP) = (TP_1)$, a ponieważ $(F'P') = (F'P_1')$, gdyż $P'P_1'$ jest znikomo małe, przeto mamy

$$(PAF'P') = (P_1A_1F'P_1').$$

Stąd wynika, że

$$(PSS'P') = (P_1S_1S_1'P_1')$$

Jeśli obecnie nazwiemy przez F_1' punkt przecięcia promieni $P'S'$ i $P_1'S_1'$, to jest on sprzężony z punktem nieskończenie oddalonym T_1 na promieniu PS . Niech PN i $P'N'$ będą prostopadłymi do P_1S_1 i $P_1'S_1'$, otrzymujemy wzór, podobny do poprzedniego

$$(PSS'F_1') = (NS_1S_1'F_1').$$

¹⁾ Drogą optyczną nazywamy wyrażenia $\sum nl$, gdzie n oznaczają wskaźniki załamania, zaś l odcinki geometryczne w poszczególnych ośrodkach.

Z porównania dwóch ostatnich wzorów wynika

$$(F_1' P') = -(NP_1) + (F_1' P_1').$$

Zastąpmy obecnie drogi optyczne przez długości geometryczne, znosząc nawiasy. Mamy

$$(NP_1) = n \cdot NP_1 = n \cdot PP_1 \sin u$$

i również

$$(E_1' P_1) - (E_1' P_1') = n' \cdot N' P_1' = n' P' P_1' \sin u'.$$

Po zastąpieniu dróg optycznych przez długości geometryczne otrzymujemy $n \cdot PP_1 \sin u = n' P' P_1' \sin u'$, skąd

$$\frac{\sin u}{\sin u'} = \frac{n' y'}{n y} = \frac{n'}{n} G = \text{const.},$$

gdzie, jak zwykle, $PP_1 = y$ i $P'P_1' = y'$. Aby więc powiększenie poprzeczne $G = \frac{y'}{y}$ było wielkością stałą, trzeba aby dla różnych punktów takich, jak P_1' stosunek sinusów u i u' był stały. Ten stosunek

$$\frac{\sin u}{\sin u'} = \frac{n'}{n} G \quad (\text{wzór Abbe'go})$$

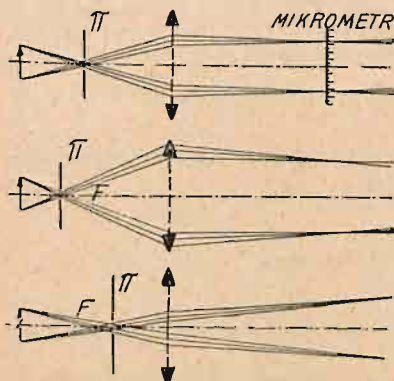
otrzymał nazwę reguły sinusów albo warunku aplanetyzmu. Punkty P i P' są punktami aplanetycznymi, i cały układ nosi nazwę aplanetycznego.

Porównując wzór Abbe'go z zależnością Lagrange'a, widzimy, że zachodzi pomiędzy nimi sprzeczność, chyba, że kąty u i u' są bardzo małe. Wyprowadzamy stąd wniosek, że jest rzeczą niemożliwą fizycznie otrzymać duży obraz, którego wszystkie punkty otrzymywałyby dowolnie rozwarte pęki promieni.

Dodatkowe rozumowanie przekonywa nas, że zapomocą rozwartego pęku promieni nie można osiągnąć aplanetyzmu dla więcej, niż jednego położenia przedmiotu.

Twierdzenie Abbe'go posiada doniosłe znaczenie dla teorii mikroskopu. Widzimy z niego, że w mikroskopie, dzięki wyzyskaniu własności punktów aplanetycznych, otrzymujemy obraz małego elementu płaskiego, którego poszczególne punkty wysyłają bardzo rozwarte pęki promieni. Zmieniać położenie przedmiotu względem obiektywu nie można pod żadnym pozorem, gdyż reguła sinusów dotyczy jedynie położenia przedmiotu. Tak więc zapomocą obiektywów mikroskopowych mogą być powiększane jedynie drobne profile płaskie, lub nader mało odbiegające od płaszczyzny. Natomiast obiektyw mikroskopowy daje duże powiększenie i przytem nader wierne, dzięki własności punktów aplanetycznych i rozlicznym innym poprawkom.

33. TELECENTRYCZNY BIEG PROMIENI. OKULAR MIKROMETRYCZNY. Dla pewnego położenia przesłanki może się zdarzyć, że jedna ze źrenic zostanie odrzucona nieskończenie daleko. Mianowicie wystarczy w tym celu umieścić przesłankę w jednym z ognisk układu.



Rys. 110

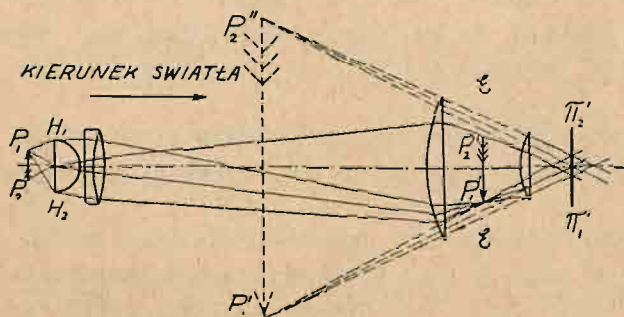
W tym wypadku mówimy o telecentrycznym biegu promieni w kierunku przedmiotu lub obrazu. Wszystkie promienie średnie są wówczas równoległe do osi. Rys. 110 zapoznaje nas z biegiem telecentrycznym w kierunku obrazu. Przesłanka Π zbiega się z płaszczyzną ogniska przedmiotowego soczewki, która daje obraz rzeczywisty przedmiotu. Jeśli przesuniemy przesłankę w prawo lub w lewo od tego położenia, bieg przestaje być telecentryczny.

Bieg telecentryczny jest nader dogodny, gdy chodzi o zmierzenie obrazu za pomocą mikrometru. Jeśli szkło, na którym

nacięta jest skala lub skrzyżowane nitki platynowe, nie znajduje się ściśle w płaszczyźnie obrazu, pomiar przy biegu telecentrycznym jest pomimo to dokładny. Bieg telecentryczny promieni stosuje się w lunetkach obserwacyjnych i mikroskopach metrologicznych. Ze względu na to, że w mikroskopie możemy zamiast przedmiotu umieścić drobną skalę naciętą na szkło z podziałką $0,01\text{ mm}$, i następnie porównać jej obraz

z przesunięciami kresek w okularze mikroskopowym, lepiej zastosować w danym wypadku telecentryczny bieg promieni ku przedmiotowi.

Zanim przystąpimy do omówienia konstrukcji okularu mikrometrycznego, który zyskał w metrologii wielką sławę i, być może, został



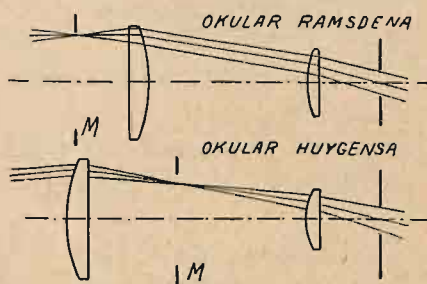
Rys. 111

niedokładny, gdyż nie daje dokładności, jakiej możnaby się po nim spodziewać, musimy wspomnieć o całości mikroskopu.

Jak wiadomo powszechnie, mikroskop składa się z obiektywu, dającego rzeczywisty powiększony znacznie obraz przedmiotu, i okularu, powiększającego jeszcze bardziej obraz i działającego jak lupa, czyli dającego obraz urojony (rys. 111). Obiektyw w swej najprostszej postaci

może się składać z dwóch soczewek, zwykle jednak, o ile chodzi o zastosowania metrologiczne, składa się on z dwóch par soczewek. Ogólne powiększenie mikroskopu metrologicznego wynosi 8,20 do 60 razy. Okulary bywają w mikroskopach dwojake:

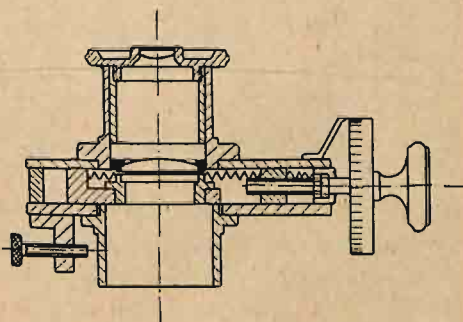
Okular Ramsdena (rys. 112) składa się z dwóch soczewek płaskowypukłych, których płaskie strony są zwrócone na zewnątrz. Umieszcza się go w tubusie mikroskopu tak, że obraz rzeczywisty, jaki otrzymujemy za pomocą obiektywu, znajduje się tuż przed soczewką przednią. Następnie okular skierowuje promienie ku źrenicy wyjściowej mikroskopu, działając jako lupa. Telecentryczny bieg promieni sprawia, że przesunięcie przypadkowe płaszczyzny obrazu nie wpływa na dokładność pomiaru.



Rys. 112. *M* — mikrometr

Okular Huygensa składa się również z dwóch soczewek płaskowypukłych, posiadających jednak różne odległości ogniskowe. Mianowicie ogniskowa soczewki przedniej jest większa od ogniskowej soczewki tylnej. Obraz, dawany przez obiektyw, musi się znaleźć poza soczewką przednią (rys. 112). Pomiar mikrometryczny nie jest możliwy w tym wypadku, gdyż obraz przedmiotu jest widziany przez obie soczewki, zaś podziałki mikrometrycznej przez jedną tylko. W okularze Huygensa obie strony wypukłe soczewek są zwrócone ku obiektywowi.

Rys. 113 zapoznaje nas z konstrukcją okularu mikrometrycznego. W skrzyneczce przed soczewką przednią znajduje się mały suwaczek, przesuwany za pośrednictwem bardzo dokładnej śruby mikrometrycznej. Długie sprężynki, przechodzące po obu stronach śruby mikrometrycznej, przyciągają suwaczek ku tarczy podziałowej mikrometru, usuwając wszystkie zbyteczne luzy. Kreski są najczęściej nacięte na szkiełku diamentem. Można poślizgiwać się również skalą zmniejszoną fotograficznie. Przy rozbieraniu okularu należy postępować bardzo ostrożnie, aby nie uszkodzić nitek platynowych, o ile znajdują się one wewnątrz.



Rys. 113. Okular mikrometryczny

Wogóle, rozbieranie mikroskopu należy powierzyć specjalście: czyszczenie mikroskopu samemu w praktyce warsztatowej prowadzi

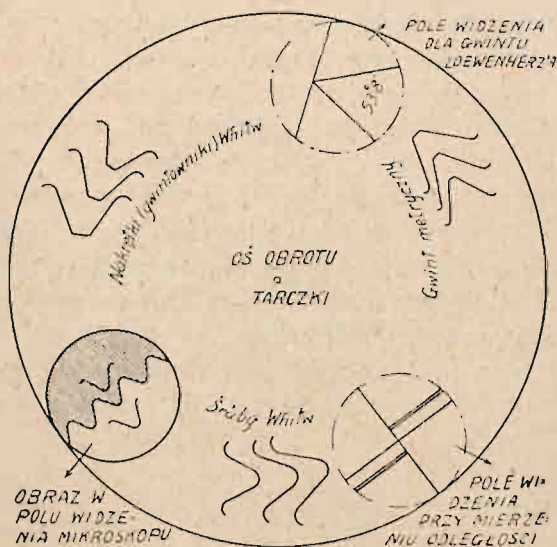
zwykle do zepsucia i porysowania szkiełek. Z tego powodu należy dbać bardzo o to, by chronić mikroskop od zakurzenia.

Podziałce okularu mikrometrycznego nie należy nigdy w zupełności dowierzać, gdyż sama metoda nie jest tak pewną, jakby się to mogło niejednemu wydawać. Dobrze jest porównać skalę okularu z podziałką na samym przedmiocie. W tym celu umieszcza się w płaszczyźnie przedmiotowej skalę na szkiełku z podziałką 0,01 mm. Zwykle skala ta służy zarazem do sprawdzenia działania samego mikroskopu.

Zastosowania okularu mikrometrycznego są nader różnorodne. Używa się go do bezpośredniego mierzenia bardzo drobnych przedmiotów, do wyznaczania błędów różnych podziałek i t. p. W połączeniu z wzorcami długości daje on możliwość sprawdzania długości pewnych przedmiotów,

czy też wzorców kreskowych. Jego właściwy użytek będzie omówiony przy opisach kilku pierwszorzędnych maszyn i przyrządów mierniczych, i dlatego na tem miejscu ograniczymy się do wspomnienia o jednym nowem ważnem zastosowaniu, mianowicie o mikroskopie do sprawdzania profilów gwintowych i zębatych.

Jeśli na szkiełku w okularze mikroskopowym będą wykonane drobne profile gwintów w odpowiednio zmniejszonej skali, to obserwując bezpośrednio śruby z danym gwintem przez mikroskop, możemy z łatwością osądzić, czy uchybie-



Rys. 114. Okular rewolwerowy

nia profilu są dopuszczalne, czy też nie. Rys. 114 zapoznaje nas z konstrukcją odnośnego mikroskopu Zeiss'a. Okular jest przytem skretny tak, że każdy profil możemy nastawić na badaną śrubę.

34. APARATY PROJEKCYJNE. Mikroskop jako całość nie nadaje się do powiększania drobnych profilów, gdyż za pośrednictwem okularu otrzymujemy nie rzeczywisty, lecz urojony obraz przedmiotu. Jeśli zaczniemy jednak odsuwać tylną soczewkę okularu, na ekranie z tyłu za mikroskopem otrzymujemy obraz. T. zw. okular projekcyjny posiada możliwość poosiowego przesuwania tylnej soczewki.

Stosunek powiększenia projekcji można znaleźć z łatwością na podstawie wzorów dla powiększenia linowego. Niech y_1 będzie odcinkiem przedmiotu, y_1' jego obrazem, dawanym przez obiektyw. Niech następnie y_2' będzie obrazem tego odcinka, danym przez okular projekcyjny. Powiększenie całkowite mikroskopu wyniesie wówczas $N = y_2' / y_1$. Wzory Newtona dają nam

$$\frac{y_1'}{y_1} = \frac{x_1'}{f_1'} = \frac{\Delta}{f_1'} \quad \text{ i } \quad \frac{y_2'}{y_1'} = \frac{x_2'}{f_2'}$$

skąd otrzymujemy

$$N = \frac{\Delta}{f_1'} \cdot \frac{x_2'}{f_2'}$$

przyczem Δ oznacza w przybliżeniu długość tubusa mikroskopowego, f_1' ogniskową tylną obiektywu, f_2' ogniskową tylną okularu, zaś x_2' odległość ekranu od okularu. Jeśli powiększamy profil za pośrednictwem jedynie obiektywu, powiększenie będzie równe odległości obiektywu od ekranu, podzielonej przez ogniskową obiektywu. Jeśli układ projekcyjny składa się z obiektywu i okularu, należy otrzymane poprzednio powiększenie przemnożyć przez powiększenie okularu. Dla zastosowań może to w wielu razach wystarczyć, gdyż rachunek powyższy służy tylko dla przybliżonego ustawienia aparatury. Zwykle ekran z wykreślonym na nim profilem ustawia się zapomocą odpowiedniego wzorca tak, że aparat projekcyjny służy tylko jako komparator. Jeśli zachodzi potrzeba ścisłego ustalenia powiększania, należy użyć w danym razie skali w setnych milimetra, co jest zarazem próbą zdolności rozdzielczej (rozpoznawczej) mikroskopu.

Przy powiększaniu zapomocą obiektywu mikroskopowego należy zwalczyć dwie zasadnicze trudności: oświetlenie i prostoliniowość osi ławy optycznej. Ustrój mikroskopu projekcyjnego obejmuje nie tylko obiektyw i okular, lecz również i kondensor, skupiający światło na profilu badanym. Tym sposobem mamy do czynienia zawsze nie tylko z obrazem profilu, lecz również i z obrazem lampy, której wybór i należyte ustawienie nastęrcza wiele trudności. Najczęściej używa się w danym wypadku lampy łukowej niskoświecowej, specjalnych żarówek projekcyjnych, lamp Nernsta i t. p. W ostatnich czasach wielkiem i zasłużonem powodzeniem cieszą się lampki punktłowe (pointolite) wynalazku angielskiej wytwórni Swan-Edison¹⁾. Działanie ich polega na tem, że wąski, ale niezwykle intensywny potok elektronów, odrywających się z wolframowej spiralki, uderza o znajdującą się naprzeciwko wolframową gałeczkę i rozżarza ją do oślepiającej białości. Światło otrzymane posiada blask, przewyższający lampy

¹⁾ Wyrabia je również wytwórnia Philips.

lukowe, zaś sama powierzchnia jest przytem bardzo ograniczona tak, że można mówić o „świecącym punkcie“. Rzecz prosta, że tak skoncentrowane i jednostajne źródło światła posiada wyższość nad lampami lukowymi, których krater ulega stałym przeobrażeniom.

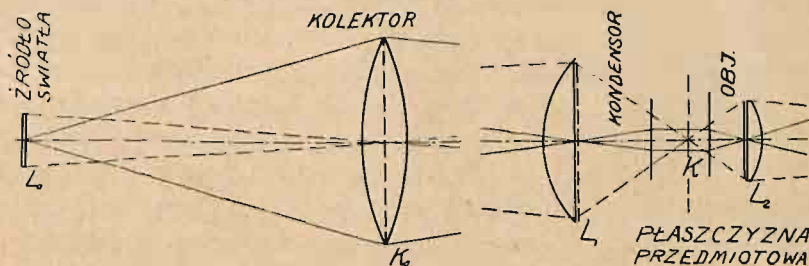
Ława optyczna musi być sztywna, dość masywna i umieszczona na odpowiedniej podstawie, nawet fundamencie. Przy większych powiększeniach wszelkie drgania i przesunięcia są bardzo niemiłe i często wprost uniemożliwiają pomiary. Ławę optyczną dla specjalnych celów należy „konstruować“ a nie „improwizować“. Poszczególne elementy na ławie optycznej, jak soczewki, przesłonki i suporty powinny być dobrze wycenrowane. Dobrze jest przewidzieć odrazu wszelkie możliwe wypadki oświetlenia tak, aby przechodzenie od jednych pomiarów do drugich połączone było z jak najmniejszą stratą czasu. Najlepsze w użyciu są aparaty, wystudjowane i zbudowane dla ściśle określonych czynności, np. do mierzenia śrub, lub tylko do profilów. Ze względu na wielkość mierzonych przedmiotów niepodobna stworzyć jednego uniwersalnego aparatu projekcyjnego, i dlatego w ostatnich czasach widzimy usiłowania, zmierzające do ustalenia zasadniczych typów aparatów projekcyjnych.

Obiektywy mikroskopowe posiadają małe pole widzenia i nadają się jedynie do powiększania drobnych przedmiotów. Achromaty z polem widzenia do 15 mm^2 nadają się do powiększania gwintów, drobnych profilów kół zębatych i t. p. tembardziej, że ich ogniskowe wynoszą wówczas mniej więcej od 20 do 50 mm. Większe profile należy powiększać za pomocą krótkich obiektywów fotograficznych, których pole widzenia jest znacznie większe i których odległości ogniskowe wynoszą od 25 do 100 mm i więcej (planary Zeissa). Zajmijmy się obecnie ustalaniem zasad, jakimi się należy kierować przy zastosowywaniu oświetlenia w jednym i drugim wypadku. Założymy przytem, że powiększamy jedynie profile płaskie.

W mikroskopie do oświetlania używamy kondensora, który ześrodkowyywa rozwartą pęk promieni na profilu badanym. Kondensor składa się przytem zazwyczaj z kilku soczewek i przypomina pod tym względem poniekąd sam obiektyw, tylko z odwróconym kierunkiem. Przy rzutowaniu zapomocą obiektywów o większej odległości ogniskowej, z jakimi mamy do czynienia zawsze w zagadnieniach bliżej nas obchodzących, ustrój kondensora jest stosunkowo prosty i ogranicza się do układu zapewniającego poprawkę chromatyczną i w pewnym stopniu aplanetyzm. Przy użyciu krótkoogniskowych obiektywów fotograficznych, w rodzaju planarów, używa się kondensorów o większej odległości ogniskowej. Odległość ogniskowa kondensora musi pozostawać w pewnym stosunku do ogniskowej obiektywu. Przy obiektywach mikroskopowych nie można umieścić lampy bezpośrednio przed kondensorem i w tym celu należy

użyć soczewki, skupiającej światło. Przy ustawianiu aparatury ustala się położenie obrazów źródła światła przez próby zapomocą kawałka papieru.

Rys. 115 zapoznaje nas z biegiem światła przy użyciu obiektywów o dużej i średniej rozwartości obiektywu. L_0 przedstawia lampę. Soczewka skupiająca, czyli t. zw. kolektor K_0 , daje obraz krateru lampy łukowej w L_1 , otworze kondensora mikroskopowego. Kondensor ze swej strony daje obraz kolektora w K_1 , w płaszczyźnie przedmiotowej obiektywu. Odnośne odwzorowanie jest wyznaczone zapomocą linii kreskowanych, podobnie jak i same obrazy K_0 i K_1 . Jeśli przejrzymy metodycznie bieg promieni określonych zapomocą linii ciągłych i przerywanych, to przekonamy się, że co dla jednego układu jest otworem wlotowym, to dla drugiego żrenicą, i odwrotnie. W obu układach otrzymujemy naprzemian otwory wlotowe i żrenice. Z K_1 promienie kreskowane skierowują się ku żrenicy wlotowej obiektywu, w którego tylnym ognisku otrzymujemy znowu obraz lampy L_2 . Dalszy bieg promieni już nas nie obchodzi. Łatwo przytem



Rys. 115. Układ optyczny przy projekcji mikroskopowej

przekonać się, że przesłonięcie (zdiafragmowanie) kolektora K_0 nie zmienia jasności obrazu kolektora w K_1 , a jedynie ten obraz staje się nieco mniejszy. Przesłonięcie (zdiafragmowanie) kondensora w L_1 zmniejsza obraz L_2 w tylnym ognisku obiektywu. W tym wypadku wygląda na to, jak gdybyśmy zmniejszyli wymiary samego źródła światła. Z rys. 115 łatwo wywnioskować, że lampa przy mikroprojekcji stanowi otwór wlotowy dla całego układu. Punktowe światło nie jest w tym wypadku konieczne. Lepiej zastosować w tym razie źródło światła nieco większe, jednak możliwie intensywne, np. lampę łukową z dobrze umiejscowionym kraterem.

Wszystkie promienie, przechodzące przez układ, można uszeregować według dwóch kompleksów stożków. Jeden kompleks, zaznaczony liniami ciągłymi, składa się ze stożków, których podstawami jest żrenica kolektora, i których wierzchołki znajdują się w poszczególnych punktach krateru lampy. Ten kompleks stożków odwzorowuje lampę na kondensorze. Drugi kompleks składa się ze stożków, których wierzchołki znajdują się

w płaszczyźnie kolektora, zaś wspólna podstawa w kraterze lampy. Każdy z obu kompleksów zawiera wszystkie promienie, wychodzące z lampy i trafiające do kolektora; są one jednak inaczej uszeregowane. Każdy promień w jednym kompleksie musi znaleźć się i w drugim. Jeśli przesłoniemy kolektor, nie zmniejszy się liczba czynnych stożków kompleksu (1), ale za to rozwarłość każdego ze stożków. Odwrotnie rzecz się ma w danym wypadku z kompleksem (2), którego stożki będą tak samo rozwarłe, natomiast ich liczba się zmniejszy. Dla kompleksu (1) przesłonka kolektora jest źrenicą, ograniczającą rozwarłość każdego stożka. Dla stożków, odwzorowujących kolektor w płaszczyźnie profilu badanego, przesłonka kolektora jest otworem wlotowym, ograniczającym liczbę stożków, lecz nie ich rozwarłość. Obraz przesłonki kolektora należy uzgodnić z otworem wlotowym obiektywu w płaszczyźnie profilu badanego. Należy tak zdiafragmować kolektor, aby oświetlić tylko właściwy profil, unikając wszelkich zbytecznych refleksów.

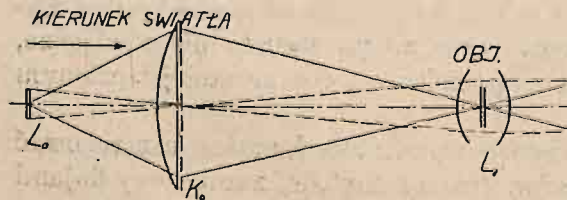
Obiektywy fotograficzne, używane do projekcji, muszą czynić zadość całemu szeregowi wymagań, a przede wszystkim obrazy, przez nie dawane, nie mogą dawać zwichrowania i aberacji chromatycznej. Przy wyborze obiektywu mogą wchodzić w grę tylko pierwszorządne anastygmaty.

Zasadniczo używa się w tym celu t. zw. dubletów symetrycznych, czyli układu soczewek, symetrycznego względem płaszczyzny środkowej, w której umieszczona jest przesłonka.

Dublety symetryczne usuwają zwichrowanie obrazu, co łatwo przewidzieć, biorąc na uwagę, że soczewka pierwsza daje zwichrowanie poduszkowate, a następna — baryłkowate. Wobec tego, że oba zwichrowania są jednakowe co do wielkości, i tylko różne co do znaku, znoszą się one wzajemnie. W planarach przez zastosowanie soczewek podwójnie wklęsłych i wypukłych usunięta została aberacja chromatyczna prawie zupełnie, również i pod względem usunięcia astyg-

matyzmu odpowiadają one wysokim wymaganiom. W anastygmatach aplanetycznych astygmatyzm usunięty jest prawie zupełnie (rys. 116).

Przy użyciu krótkoogniskowych obiektywów fotograficznych (rys. 117) należy użyć innego oświetlenia, niż



Rys. 117

przy projekcji mikroskopowej. Kondensor w tym wypadku stanowi zwykła płaskowypukła soczewka, w której ognisku znajduje się obraz lampy L_0

lub same źródło światła. Profil płaski zajmuje położenie K_0 , zaznaczone linią kropkowaną. Kondensor daje obraz lampy w żrenicy obiektywu. Zasadnicza różnica pomiędzy układem mikroskopowym, a układem z obiektywem fotograficznym, jest ta, że żrenice obiektywu mikroskopowego są duże w porównaniu z otworami wlotowymi, gdy tymczasem żrenice obiektywu fotograficznego są naodwrot małe w porównaniu z otworami. Stąd też wynika konieczność zastosowania zupełnie innego kondensora.

Aparaty projekcyjne do śrub są zbudowane nieco inaczej ze względu na to, że śrub nie można tak zbliżyć do kondensora, jak płaskiego profilu. Są to zawsze komparatory, dające możliwość porównywania danych gwintów i śrub z odpowiednimi wzorcami.

35. KOMPARATOR PROJEKCYJNY WILSONA. Znana londyńska wytwórnia, Adam Hilger Ltd., buduje komparator projekcyjny patentu R. P. Wilsona, który pod każdym względem zasługuje na specjalną uwagę. Rys. 118 zapoznaje nas z zastosowanym układem optycznym. Źródło światła A jest umieszczone w ognisku kolimatora B . Równoległy pęk promieni pada na umieszczoną pionowo śrubę tak, że po obu stronach otrzymujemy cienie gwintów. W dalszym ciągu równoległe promienie przechodzą przez przecięty na dwoje dublet achromatyczny, poczem dwa pryzmaty skierowują otrzymane oddzielnie obrazy na ekran. Otrzymuje się przytem nałożone jeden na drugi profile gwintów (rys. 119).

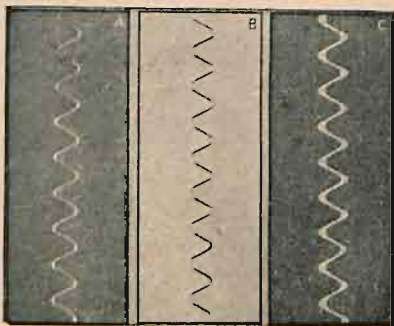
Aparat Wilsona jest komparatorem. Na odnośny stolik stawia się przedewszystkiem wzorzec i następnie doprowadza się zapomocą śrub mikrometrycznych, zsuwających lub rozsuwających półsoczewki, oraz zapomocą pokręcania pryzmaczków, obrazy gwintu do przylegania. Jeśli następnie zastąpimy wzorzec badaną śrubą, zauważymy na ekranie, że w wypadku błędów śruby obrazy się nie pokrywają. Interpretacja wyników jest nader prosta. Wykres A zapewnia nas o dokładności średnicy flankowej. Wykres B przedstawia sprawdzania głębokości gwintu, przyczem ciemne linie wykazują nakładanie się rzutów powierzchni śrubowej flanków. Wykres C wykazuje zbyt małą średnicę. W podobny sposób ustalić można stożkowość gwintu i t. p.

Rys. 120 zapoznaje nas z konstrukcją suporcika soczewkowego.

Aparat Wilsona przewiduje ustawianie osi śruby prostopadle do promieni światła, i wskutek tego na ekranie (wykres B) zjawiają się rzuty powierzchni śrubowej, nie pokrywające się z istotnym rzutem przekroju osiowego śruby. Zamiast profilów rzeczywistych otrzymujemy profile po-

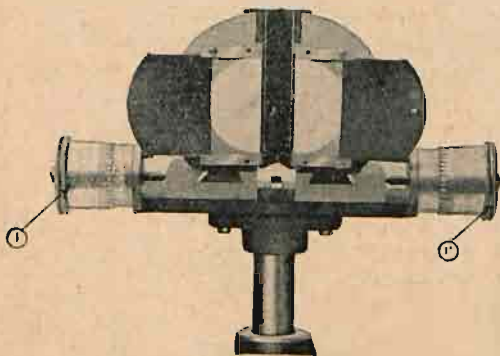


Rys. 118



Rys. 119

będzie osią śruby, zOx dowolną płaszczyzną osiową, zOy płaszczyzną osiową, prostopadłą do pierwszej. Niech OA będzie promieniem r śruby



Rys. 120

nie xOz przy rzucaniu cienia zapomocą pęku promieni równoległych do Oy , będzie wynikiem rugowania y pomiędzy równaniem powierzchni śrubowej,

a pochodną $\frac{\partial z}{\partial y}$, przyrównaną do zera:

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tan \alpha + \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} = 0$$

$$\text{Mamy stąd: } y\sqrt{x^2 + y^2} + \frac{P \cot \alpha}{2\pi} x = 0$$

$$\text{Zakładając } \frac{P \cot \alpha}{2\pi} = m \text{ otrzymamy } y\sqrt{x^2 + y^2} + \frac{m}{2} x = 0,$$

$$\text{skąd znowu } y^2 = \frac{x^2}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{m^2}{x^2}} - 1 \right]$$

zorne, wynikające z rzutowania dwóch powierzchni śrubowych. W innych aparatach projekcyjnych pęk promieni równoległych skierowywujemy na gwint pod pewnym kątem optymalnym, mianowicie pod kątem pochylenia podziałowej linii śrubowej. Ze względu na przyrząd Wilsona i możliwość różnych zastosowań dobrze jest znać przesunięcie profilu pozornego względem rzeczywistego. W tym celu ustalmy naprzód równania powierzchni śrubowej gwintu (rys. 121). Niech Oz

dla dna ostro zakończzonego gwintu, zaś AB bokiem odcinka, tworzącego powierzchnię gwintu. Równanie powierzchni śrubowej, utworzonej przez ruch odcinka AB , będzie

$$z = (\sqrt{x^2 + y^2} - r) \tan \alpha + \frac{P}{2\pi} \arctan \frac{y}{x},$$

gdzie P jest dodatnie lub ujemne zależnie od kierunku obrotu śruby.

Równanie profilu pozornego, jaki otrzymuje się na płaszczyźnie

$$y^2 + x^2 = \frac{x^2}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{m^2}{x^2}} + 1 \right]$$

Wyrażenie pod znakiem pierwiastka rozkładamy w szereg dwumianowy:

$$\left(1 + \frac{m^2}{x^2}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{m^2}{x^2} - \frac{1}{8} \frac{m^4}{x^4} + \frac{1}{16} \frac{m^6}{x^6} - \frac{5}{128} \frac{m^8}{x^8} + \frac{7}{256} \frac{m^{10}}{x^{10}} - \dots$$

$$y^2 = \frac{x^2}{4} \cdot \frac{m^2}{x^2} \left[1 - \frac{1}{4} \frac{m^2}{x^2} + \frac{1}{8} \frac{m^4}{x^4} - \frac{5}{64} \frac{m^6}{x^6} + \frac{7}{128} \frac{m^8}{x^8} - \dots \right] =$$

$$= \frac{x^2}{4} \cdot \frac{m^2}{x^2} \left[a_1 + a_2 \frac{m}{x} + \dots \right]^2$$

Pierwiastek kwadratowy z szeregu w nawiasach otrzymujemy, stosując metodę współczynników nieoznaczonych¹⁾ i przyrównując współczynniki tych samych potęg $\frac{m}{x}$. Otrzymamy tym sposobem

$$y = \frac{m}{2} \left[1 - \frac{1}{8} \frac{m^2}{x^2} + \frac{7}{128} \cdot \frac{m^4}{x^4} - \frac{33}{512} \frac{m^6}{x^6} + \dots \right]$$

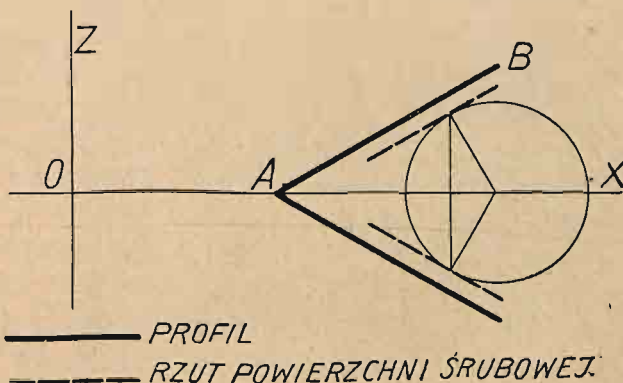
i podobnie $\sqrt{y^2 + x^2} = x \left[1 + \frac{1}{8} \frac{m^2}{x^2} - \frac{5}{128} \cdot \frac{m^4}{x^4} + \frac{21}{512} \frac{m^6}{x^6} - \dots \right]$

Aby ostatecznie z wyrażenia na z wyrugować y , musimy obecnie rozwinąć $\arctang \frac{y}{x}$ w szereg i podstawić weń otrzymany poprzednio szereg

$$y = \frac{m}{2} \left[1 - \frac{1}{8} \frac{m^2}{x^2} + \dots \right]$$

Stosujemy rozłożenie w szereg:

$$\arctang \frac{y}{x} = \frac{y}{x} - \frac{1}{3} \frac{y^3}{x^3} + \dots$$



Po podstawieniu otrzymujemy

Rys. 121

$$z = \left[x \left(1 + \frac{1}{8} \frac{m^2}{x^2} - \frac{5}{128} \frac{m^4}{x^4} + \dots \right) - r \right] \tan \alpha -$$

$$- \frac{P}{2\pi} \left[\frac{m}{2x} \left(1 - \frac{1}{8} \frac{m^2}{x^2} + \frac{7}{128} \frac{m^4}{x^4} - \dots \right) + \frac{1}{24} \frac{m^3}{x^3} - \dots \right]$$

¹⁾ E. Goursat. Kurs analizy matematycznej, Tom I, str. 452.

skąd wreszcie, zatrzymując się na wyrazach trzeciego stopnia:

$$z = (x - r) \operatorname{tang} a - \frac{1}{8} \frac{P^2}{\pi^2} \left(\frac{\operatorname{cotg} a}{x} \right) + \frac{5}{384} \frac{P^4}{\pi^4} \left(\frac{\operatorname{cotg} a}{x} \right)^3$$

Analizując otrzymany wynik w stosunku do normalnych gwintów Whitwortha i międzynarodowego, widzimy, że wyraz trzeci pozostaje bez wpływu praktycznego, natomiast drugi daje się wyraźnie odczuć. Profil pozorny jest przesunięty względem rzeczywistego mniej przy wierzchołkach, a więcej w pobliżu rdzenia.

Rozpatrywaliśmy dotychczas przesunięcie profilu pozornego w kierunku osi śruby (przyrost spółrzednej z). Cienie zwoju gwintu na ekranie, otrzymane zapomocą aparatu projekcyjnego Wilsona, stanowią prawy i lewy profil pozorny. Gwint pozorny wydaje się grubszy w porównaniu z rzeczywistością. Obliczoną poprawkę w kierunku poosiowym śruby moglibyśmy zastąpić przez poprawkę zastępczą dla średnicy flankowej według metod, ustalonych przez angielską komisję standardyzacyjną (rozdział II).

36. APARATY PROJEKCYJNE DO GWINTÓW. Pomimo stosunkowo krótkiego czasu wprowadzenia do praktyki przemysłowej aparatów projekcyjnych, istnieje ich już sporo odmian, i każdy dzień przynosi nowości w dziedzinie ich zastosowań. Pod względem celowości konstrukcji wysuwają się przytem na pierwszy plan aparaty projekcyjne, budowane przez National Physical Laboratory w Teddington. W przemyśle popularność zdobyły aparaty projekcyjne Hartness'a ¹⁾ i Herberta.



Rys. 122

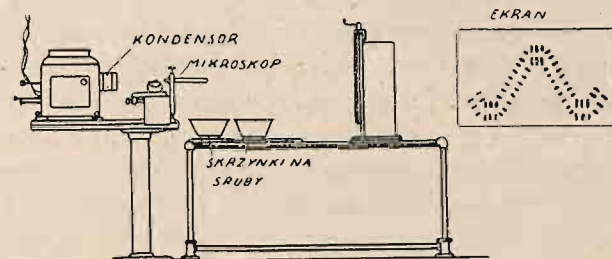
W aparacie poziomym, budowanym przez National Physical Laboratory, lampa łukowa czy punktłowa jest umieszczona wraz z kondensorem na skręcie tak, że snop promieni równoległych może padać pod dowolnym kątem nachylenia na gwint. Nastawienie na żądany kąt jest niezwykle łatwe. Mianowicie na ekranie otrzymujemy

zazwyczaj obok właściwego cienia i półcień, odpowiadający bokom gwintu, oświetlanym ukośnie. Z chwilą, gdy snop światła staje się stycznym do powierzchni śrubowej gwintu, ów półcień znika i na ekranie ukazują się wyraźne profile obustronne. Nastawienie na ostrość odbywa się zapomocą sznurków, przeciągniętych przez rolki na suficie ze stano-

¹⁾ Przegląd Techniczny 1923.

wiska obserwatora, stojącego zdala od lampy tuż przy ekranie. Deska pionowa, do której przymocowywa się arkusze białego papieru z nakreślonymi profilami, posiada prowadzenie pionowe i poziome tak, że obserwator może z łatwością uzgodnić położenie profilów względem cienia. Deska, stanowiąca ekran, jest wyrównowazona tak, że zatrzymuje się w każdym położeniu.

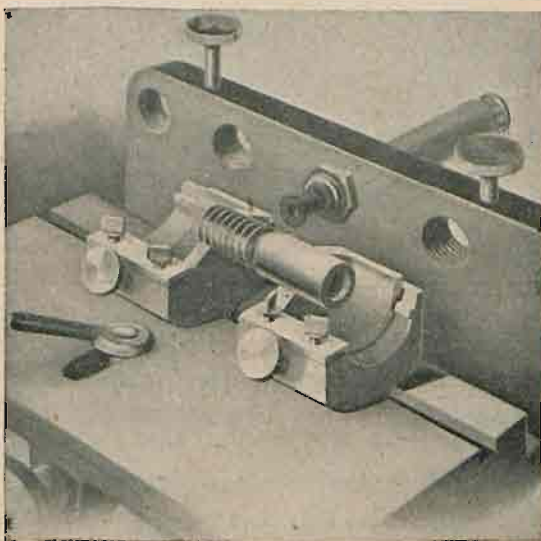
Przy sprawdzaniu kół zębatach zachodzi ta trudność, że profil jest długi w kierunku promieni światła, i nie można nastawić obrazu na ostrość, gdyż profil roz-



Rys. 123. Aparat Hartness'a

ciąga się przed i poza ognisko układu soczewkowego. W tym wypadku można w płaszczyźnie ogniskowej umieścić szereg szpilek, których ostrza wyznaczają profil (rys. 122). Zamiast danych kół zębatach lepiej użyć do sprawdzenia wyfrezowanej z nimi wspólnie cienkiej blaszki.

Rys. 123 zapoznaje nas z całością aparatu Hartness'a, zaś rys. 124 ze szczegółem konstrukcyjnym suportu, podtrzymującego badane śruby. Na uwagę zasługuje charakterystyczny ekran tolerancyjny z zaznaczonymi granicami odskoku i gry gwintu. Ustawianie odbywa się przytem zawsze zapomocą wzorca, który daje cień, zgadzający się dobrze z profilem, nakreślonym na ekranie. Suporciki, w których spoczywa śruba, są skrecone na kąt, odpowiadający pochyleniu danego gwintu; każdej normalnej śrubie odpowiada inny suport. Zakładanie śrub jest nader proste i zajmuje bardzo niewiele czasu tak, że jest rzeczą możliwą sprawdza-



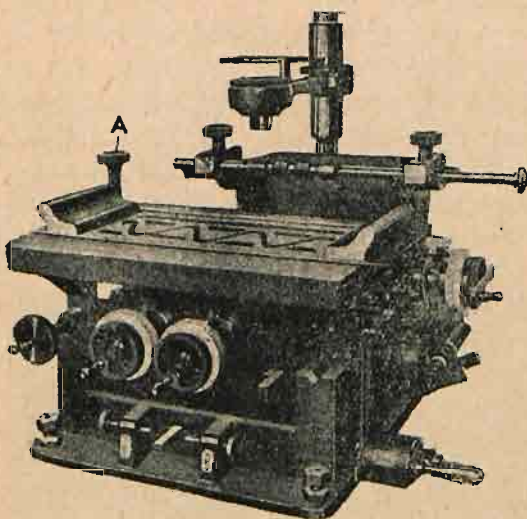
Rys. 124

nie całych partij śrub maszynowych, a nawet surowych. Komparator Hartness'a daje możność zupełnie dostatecznego sprawdzenia zamienności śrub, wykonywanych na rewolwerówkach, pod warunkiem posiadania precyzyj-

nych główek narzynkowych. Można powiedzieć, że dzięki niemu i podobnym aparatom zamiennosc śrub stała się aktualnym zagadnieniem w przemyśle¹⁾.

Rys. 125 zapoznaje nas z projekcyjną maszyną mierniczą do gwintów National Physical Laboratory. Z jej konstrukcją zapoznaje nas częściowo schemat, przedstawiony na rys. 126. Na nazwę maszyny zasługuje ten aparat ze względu na możność mierzenia na niej błędów skoku i średnic. Maszyna powyższa służy do sprawdzania wzorców do 50 mm ϕ . Dzięki zastosowaniu projekcji pionowej i odrzucania cienia na stół za pośrednictwem lustra, umieszczonego w odległości 2.150 mm ponad stołem, maszynę może dogodnie obsługiwać jedna osoba.

Kondensor *A* skierowuje snop światła z lampy łukowej do tubusu, w którym umieszczony jest pryzmat o całkowitem odbiciu. Pryzmat ten



Rys. 125. Projekcyjna maszyna do gwintów

można pokręcać zapomocą dźwigniki z rolką *R*, opierającą się o prowadnicę *P*. Drugi koniec dźwigniki opiera się o drążek *D*, którego wychylenie ograniczone jest zderzakami. Zapomocą prowadnicy *P* i drążka *D* można skierować snop promieni równoległe do gwintu śruby, zamocowanej poziomo, tak prawo — jak i lewoskrętnej, i oświetlić kolejno jeden po drugim bok gwintu. Nastawianie kierunku wiązki promieni względem osi optycznej układu soczewkowego trwa bardzo krótko i jest nader precyzyjne. Wiązka promieni po oświetleniu gwintu przechodzi

przez układ dubletowy, skąd po odbiciu od lustra pada na stół roboczy, na którym znajduje się profil na blasze cynkowej. Lustro jest wysrebrzone z tyłu, ale, w celu uniknięcia podwójnych obrazów po odbiciu, tafla szklana jest klinowata, i wskutek tego słaby cień, powstający przy odbiciu się od powierzchni szkła, jest odrzucony znacznie na bok. Do nastawiania drążka *D* służy dodatkowa soczewka *S* z diafragmą. Daje ona możność uzgodnienia optycznej osi układu ze środkiem ekranu.

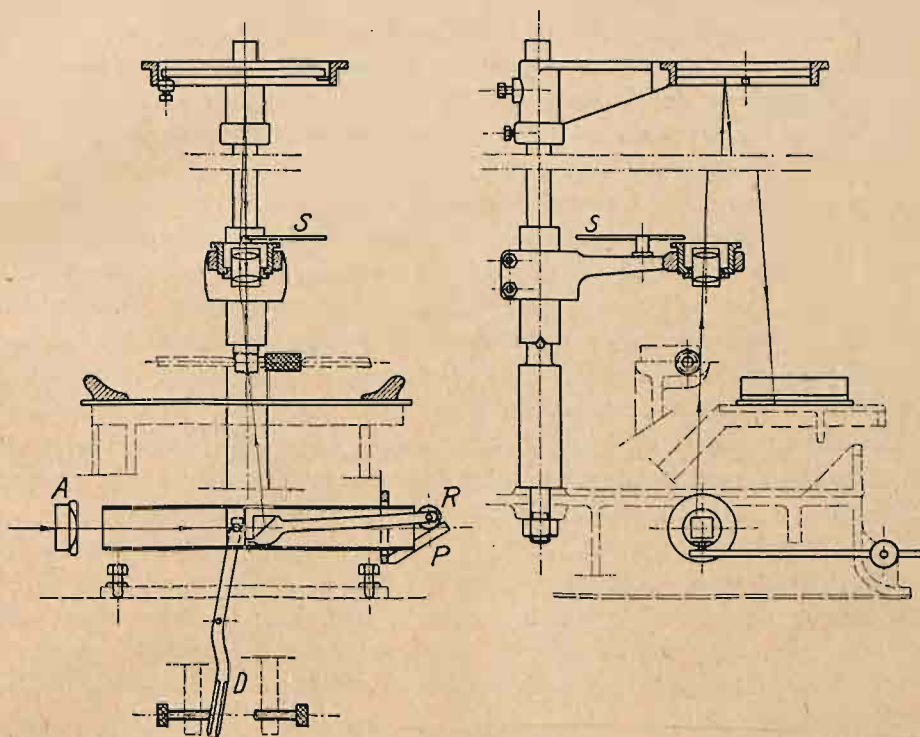
Aparat powiększa profile 50 razy. Na blasze cynkowej wykonane są profile tolerancyjne w postaci wstęg, szerokości około 12 cm dla gwintów średniej wielkości. Wstęgi te są szare, zaś cień występuje na nich

¹⁾ Screw-Threads Hartness Comparator. Wyd. Jones Lamson Comp. Vermont 1922.

jako zupełnie czarny i wyraźny. Zwłaszcza wyraźne jest każde wyjście cienia poza wstęgę tolerancyjną.

Sprawdzanie kąta gwintu odbywa się w sposób nader prosty, a mianowicie przez przykładanie do cienia na ekranie kątomierza nastawnego, podobnego do tych, jakich używają kreślarze.

Stół roboczy posiada przesuwę krzyżową, zaopatrzoną w śruby mikrometryczne, dające możliwość odczytywania bezpośredniego z dokład-



Rys. 126. Schemat teddingtońskiego aparatu projekcyjnego do gwintów

nością do 2μ . Jak to się często powtarza w nowych przyrządach angielskich, w maszynie zastosowano przewodnice kulkowe.

Na wzór omawianej maszyny zbudowany został aparat projekcyjny Wickman'a (A. Herbert). Jest on jednak znacznie prostszy i przystosowany do potrzeb warsztatowych. Zastosowanie projekcji pionowej daje możliwość umieszczenia aparatu w niewielkim pokoiku, co posiada wielkie znaczenie w praktyce.

37. MIKROSKOP ZEISSA DO MIERZENIA GWINTÓW. Jak już wspominaliśmy o tem, mikroskop z okulem mikrometrycznym był zasadniczym narzędziem, stosowanym w zagadnieniach metrologicznych,

i stosowano go oddawna do mierzenia skoku gwintu. W ostatnich czasach, wraz z rozwojem i docenianiem zagadnienia zamienności śrub, zjawiała się dążność do udoskonalenia tej metody. Widzimy więc, że najważniejsze wytwórnie przyrządów metrologicznych, jak Société Gènevoise w Szwajcarii, Zeiss w Niemczech, Herbert w Anglii stwarzają różne typy mikroskopu do gwintów¹⁾.

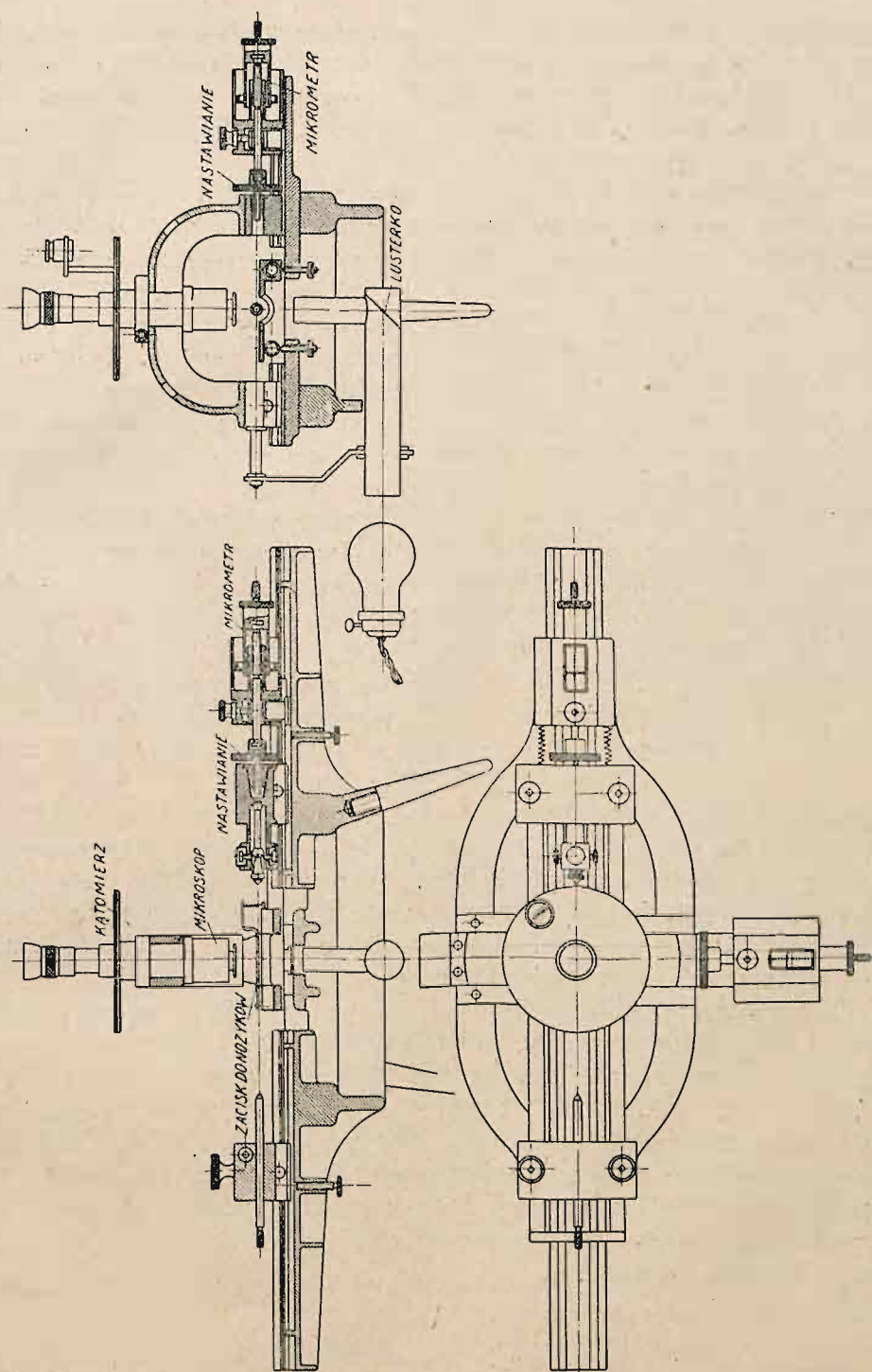
W celu ułatwienia pomiarów przy wykonywaniu wzorców śrubowych, Société Gènevoise poszło tak daleko, że umieszcza swój mikroskop do gwintów bezpośrednio na suporcie swej znanej szlifierki do gwintów. Mikroskop Herberta stanowi odrębny przyrząd, mocno zbudowany i nadający się doskonale do praktyki fabrycznej. Poniżej podajemy opis mikroskopu Zeissa ze względu na jego charakterystyczną konstrukcję²⁾.

Rys. 127 zapoznaje nas z konstrukcją mikroskopu. Kadłub stanowi pierścieniowa ramka z trzema nóżkami. W odpowiednich prowadnicach kulkowo-ślizgowych przesuwą się suporcik z trzpieniem nastawnym i głowiczką do zamocowania sprawdzanego wzorca śrubowego w odpowiednich kłach. Dokładnie pod kątem prostym względem osi kłów umieszczony jest nad ramką suporcik z mikroskopem. Każdy z suporcików posiada głowiczkę ze śrubą mikrometryczną, którą można zacisnąć w dowolnym położeniu na prowadnicach w ten sposób, że śruba mikrometryczna odpycha zlekka suporcik, przyciągany zapomocą sprężynki. Suporciki posiadają niezwykle miękki przesuw dzięki specjalnej konstrukcji prowadnic, odciążonych zapomocą kulek. Wobec tego, że uzgodnianie położenia mikroskopu względem gwintu odbywa się wzrokowo przez obserwowanie kreski w polu widzenia, „czucie” przy posiłkowaniu się śrubą mikrometryczną nie odgrywa tu najmniejszej roli, i pomiar może być skuteczniejszy z dokładnością, na jaką pozwala obserwacja położenia kreski. Przy starannem mierzeniu można z łatwością osiągnąć dokładność, wynoszącą 2μ .

Charakterystyczną cechą mikroskopu Zeissa jest stosowanie w nim specjalnych nożyków, przykładanych do flanków gwintu ściśle w płaszczyźnie osiowej śruby. Powstają przytem szczelinki, przez które przedostaje się od spodu światło, odrzucane ku górze za pośrednictwem pryzmatu o pełnem odbiciu. Odpowiedni snop światła daje zwykła żarówka, zastonięta, w celu uzyskania równomiernego oświetlenia w polu widzenia mikroskopu, matowem szkłem zielonem. Pomimo wąskości szczelinki są nader wyraźne i, dzięki temu, dość łatwo uzgodnić położenie kreski względem środka szczelinki.

¹⁾ Por. między innemi instrukcję, dotyczącą zastosowywania mikroskopu z okularem mikrometrycznym, wydaną przez waszyngtońskie Bureau of Standards.

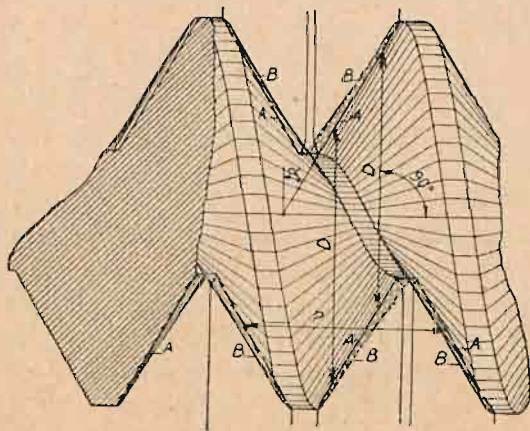
²⁾ Posiada go laboratorium metrologii technicznej politechniki warszawskiej.



Rys. 127. Mikroskop Zeiss'a do gwintów

Wobec tego, że szczelinki obserwowane leżą w płaszczyźnie osiowej śruby i że, jak to łatwo sobie przedstawić, powierzchnia śrubowa ich nie zasłania całkiem od góry, pomiar dotyczy nie pozornego, lecz rzeczywistego profilu gwintu. Stanowi to bezsporną wyższość mikroskopowej metody nad projekcyjną (rys. 128).

Nożyki można przystawiać do zwojów sąsiednich i przeciwległych. W pierwszym wypadku mierzy się skok gwintu, w drugim średnicę flankową. Górna część tubusa mikroskopowego jest zaopatrzona w skalę gonjometryczną, dzięki której odczytujemy z łatwością i kąt pochylenia flanków. Tym sposobem wszystkie pomiary są uskutečněnione za jednym razem, co przedstawia dużą zaletę metody.



Rys. 128

Przy mierzeniu kątów wierzchołkowych ustawiamy naprzód tak mikroskop, by kreski wskaźnikowe były prostopadłe do osi śruby badanej. W tym celu przylepiamy do badanej śruby za pomocą plasteliny opraweczkę ze szkiełkiem, na którym narżnięte jest mikroskopowe kołeczko. Pokręcając śrubę badaną o kąt 180° , ustawiamy opraweczkę w płaszczyźnie poziomej po drugiej stronie śruby. Jeśli przy przesuwaniu w poprzek mikroskopu kołeczko pozostawać będzie stale pośrodku kreski wskaźnikowej, mamy pewność, że znajduje się ona pod kątem prostym względem osi śruby. Po przyłożeniu nożyka do boku profilu i pokręceniu skali gonjometrycznej odczytujemy kąt.

Do sprawdzania długich śrub pociągowych istnieją mniej lub więcej starannie zbudowane przyrządy, składające się z łoża, koników do zamocowywania śruby i nakrętki pociągowej. Mierząc przesunięcia nakrętki, można zmierzyć skok. Można też obserwować bezpośrednio zwoje gwintu badanej śruby zapomocą komparatora mikroskopowego. Najdokładniejszą metodą sprawdzania śrub mikrometrycznych jest osadzanie ich w interferometrze specjalnej konstrukcji i obserwowanie przesunięć prążków przy pokręcaniu śruby i przesuwaniu suporcika z lusterkiem, odbijającym wiązkę badanych promieni.