

Ćwiczenie nr 8

Interferencyjny pomiar kształtu powierzchni

I. Zestaw przyrządów

1. Interferometr Fizeau z kopiarką
2. Oświetlacz z transformatorem
3. Lampa spektralna z zasilaczem
4. Próbkki

II. Cel ćwiczenia: poznanie zastosowań zjawiska interferencji światła w metrologii, zapoznanie się z zasadami działania i budową interferometru Fizeau, poznanie metod interferometrycznego pomiaru kształtu powierzchni.

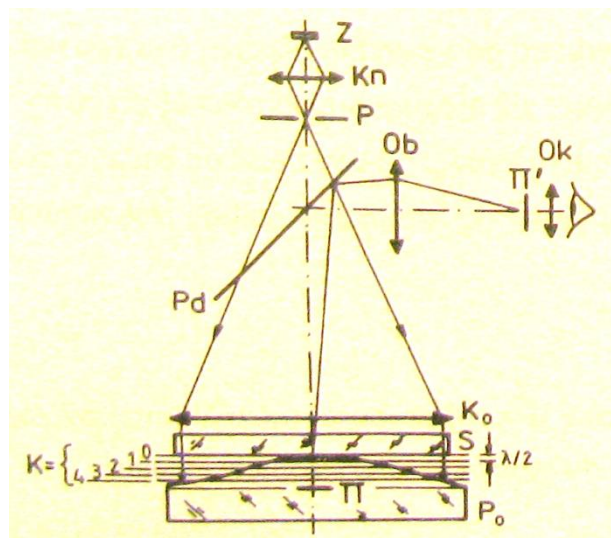
Zagadnienia: zjawisko interferencji światła, prążki interferencyjne równej grubości, interferometr Fizeau, mikrotopografia powierzchni.

III. Wprowadzenie

Do badania kształtu powierzchni wykorzystuje się prążki równej grubości otrzymane w interferencji w świetle odbitym. Interferencja zachodzi między promieniami odbitymi od powierzchni płaskiej (sprawdzianu) i od badanej. W praktyce wykorzystuje się ciemne prążki równej grubości to znaczy łączące punkty, w których odległość h_k sprawdzianu od badanej powierzchni jest jednakowa. Położenia prążków równej grubości można zmierzyć różnymi metodami. W ćwiczeniu służy do tego celu interferometr Fizeau.

III.1 Interferometr Fizeau

Do obserwacji prążków interferencyjnych równej grubości służy m.in. interferometr Fizeau (Rys. 1). Punktowe źródło światła Z zostaje odwzorowane za pomocą kondensatora Kn na otworze punktowym P umieszczonym w ognisku soczewki K_0 . Promienie wychodzą z P , częściowo przechodzą przez dzielnik światła Pd oraz soczewkę K_0 . Padają na płytkę sprawdzianu płaskiego S pod kątem $\alpha = 0$. Interferencji ulegają fale odbite od dolnej powierzchni płytki S (sprawdzianu) i górnej (badanej) powierzchni płytki P_0 . Różnicę dróg optycznych wytwarza więc warstwa powietrza między płytkami o zmiennej grubości h_m . Zakładając, że powierzchnia sprawdzianu jest płaska można zmierzyć grubości h_m a zatem i kształt powierzchni badanej. Promienie odbite (od S i P_0) zostają, po odbiciu od dzielnika światła Pd , skupione przez soczewkę K_0 w żrenicy obiektywu Ob i tworzą prążki interferencyjne w płaszczyźnie Π' (będącej odwzorowaniem płaszczyzny Π). Za płaszczyzną Π' umieszczony jest okular Ok , dzięki któremu prążki można obserwować okiem. Obiektyw Ob i okular Ok tworzą lunetkę nastawioną na obserwację płaszczyzny Π .



Rys. 1 Schemat interferometru Fizeau.

Dla interferencji w warstwie powietrza i padaniu promieni pod kątem $\alpha = 0$ warunek określający rząd interferencji dla płytki płasko-równoległej

$$m = \frac{2h_m}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{1}{2}$$

uprosi się do

$$m = \frac{2h_m}{\lambda} + \frac{1}{2} \quad (1)$$

Prążki ciemne są węższe niż jasne, więc łatwiej je mierzyć. Prążek ciemny jest zbiorem punktów ze stałym m równym nieparzystej wielokrotności $\lambda/2$, więc h_m :

$$h_m = \frac{\lambda(m-1/2)}{2}, \quad m = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots \quad (2)$$

jest także stałe. Stąd nazwa prążki równej grubości, ponieważ grubość powietrza h_m wzdłuż całego m -tego prążka jest stała. Wzór powyższy można zapisać w postaci

$$h_K = K \frac{\lambda}{2}, \quad K = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

gdzie K jest numerem prążka.

Z równania (3) widać, że różnica wysokości $\Delta h = h_{K+1} - h_K$ między dowolnymi prążkami o numerach $K+1$ i K wynosi $\lambda/2$. Prążki można więc traktować jako poziomicę powstające na skutek przecięcia badanej powierzchni P_0 przez płaskie powierzchnie równoległe do powierzchni sprawdzianu S i odległe od siebie o $\lambda/2$.

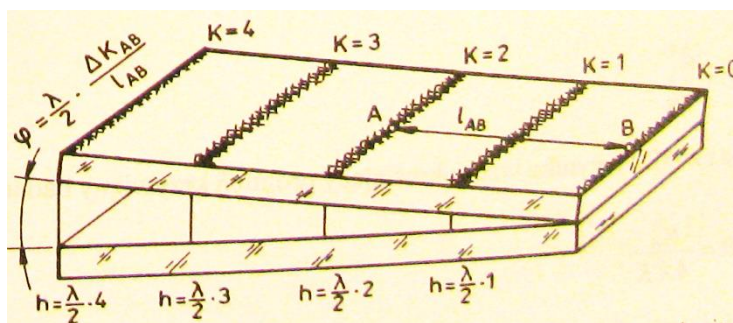
III.2 Metody pomiarowe

W zależności od tego, jakiego kształtu mamy prążki i co chcemy obliczyć, należy wybrać optymalną metodę analizy interferogramu. Aby lepiej to zrozumieć, przeanalizujemy kilka różnych przypadków:

1. Powierzchnia P_0 jest powierzchnią płaską, nachyloną do powierzchni sprawdzianu S pod kątem φ (tworząc klin powietrzny).

Prążki interferencyjne są wtedy liniami prostymi, równoległymi do krawędzi klina (Rys. 2). Pomiar różnicy rzędów interferencyjnych ΔK_{AB} między dwoma dowolnymi punktami A i B na powierzchni klina powietrznego pozwala obliczyć (wzór 3) zmianę grubości tego klina między punktami A i B

$$\Delta h_{AB} = h_A - h_B = (K_A - K_B) \frac{\lambda}{2} = \frac{\Delta K_{AB} \lambda}{2} \quad (4)$$

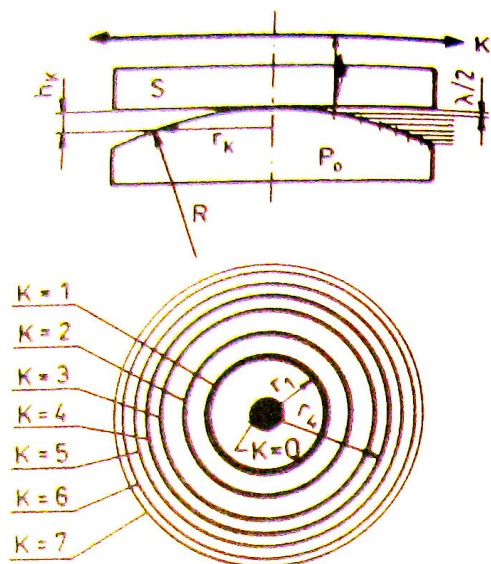


Rys. 2 Prążki interferencyjne powstające w klinie powietrznym o kącie φ .

2. Powierzchnia P_0 jest powierzchnią sferyczną, stykającą się ze sprawdzianem płaskim (Rys. 3).

Prążki ciemne powstają dla warunku (3) i mają kształt kołowy (tzw. pierścienie Newtona). W środku, w miejscu styku dla $h = 0$ powstaje prążek ciemny rzędu zerowego. Z zależności geometrycznych wynika, że promień krzywizny R badanej powierzchni sferycznej powiązany jest z długością cięciwy $d = 2r$ i strzałką sfery h zależnością $R = (d^2/8h) + h/2$. Dla $d \gg h$ zależność ta upraszcza się do

$$R = \frac{d^2}{8h} \quad (5)$$



Rys. 3 Pierścienie Newtona tworzone przez powierzchnię sferyczną.

Uwzględniając powyższe i zależność (4) dostajemy wzór określający promień krzywizny badanej sfery

$$R = \frac{d_K^2}{4\lambda K} \quad (6)$$

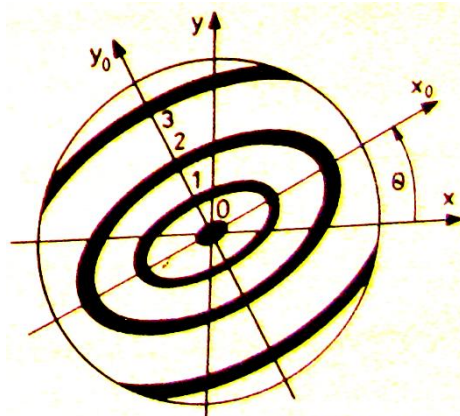
gdzie d_K jest średnicą K -tego ciemnego prążka.

Jeżeli badana powierzchnia sferyczna nie styka się z powierzchnią sprawdzianu, to w tym przypadku nie znamy bezwzględnej wartości K . Wystarczy jednak dokonać pomiarów d_K dla dwóch różnych wartości K , np. dla K i dla $K+\Delta K$. Z zależności (5) i po przekształceniach otrzymuje się zależność określającą promień krzywizny, gdy badana powierzchnia i sprawdzian nie stykają się

$$R = \frac{d_{K+\Delta K}^2 - d_K^2}{4\lambda \Delta K} \quad (7)$$

Zależności (6) i (7) pozwalają na tyle dobrze wyznaczyć promienie krzywizny sfery, na ile można badać sferę (całą jej powierzchnię), odtworzyć trzema punktami osiowego przekroju. Dlatego też dla różnych K można otrzymać nieco różne wartości R . Badana powierzchnia sferyczna może być powierzchnią wklęsłą lub wypukłą. Sprawdzenie, czy badana powierzchnia jest wklęsła czy wypukła, odbywa się zgodnie z zasadami podanymi w p. 6.

3. Jeżeli pierścienie Newtona nie są kołami ale elipsami (Rys. 4), świadczy to o tym, że badana powierzchnia nie jest sferą, lecz powierzchnią toryczną, dla której można zmierzyć dwa promienie krzywizny (maksymalny i minimalny). Promienie te mierzymy w przekrojach wzdłuż dużej i małej osi elipsy. Kąt Θ opisuje usytuowanie tej złożonej powierzchni względem osi X badanej próbki. Promienie krzywizny wyliczamy tak jak w przypadku pierścieni Newtona.



Rys. 4 Eliptyczne pierścienie Newtona.

4. Jeżeli promienie krzywizn badanych sfer są bardzo duże, może okazać się, że w polu widzenia nie mieści się ani jeden pierścień. Bada się wtedy odstępstwo prążków od prostoliniowości (Rys. 5).

Gdy na prążku interferencyjnym obierzemy dwa punkty A i B, wtedy, mierząc odległość między-prążkową s_{AB} i strzałkę t_{AB} w środku cięciwy AB, można obliczyć różnicę wysokości między punktem C a poziomem wyznaczanym przez prążek, na którym znajdują się punkty A i B. Korzystamy ze wzoru określającego h dla punktów A i C. Z ich różnicy wynika, że

$$\Delta h = \frac{\Delta h \lambda}{2} = \frac{\lambda t_{AB}}{2 s_{AB}} \quad (8)$$

dla cięciwy d (Rys 5) mamy $\Delta K = t/s$.

Wiadomo również że różnica wysokości Δh stanowi strzałkę dla cięciwy AB badanej sfery, a więc promień tej sfery oblicza się z zależności

$$R^2 = (AC)^2 + (R - \Delta h)^2.$$

Ponieważ $\Delta h \ll 2R$, więc z powyższego wzoru wynika

$$\Delta h = \frac{(AC)^2 + \Delta h^2}{2R} \approx \frac{(AC)^2}{2R} \approx \frac{(AB)^2}{8R}.$$

Ostatecznie

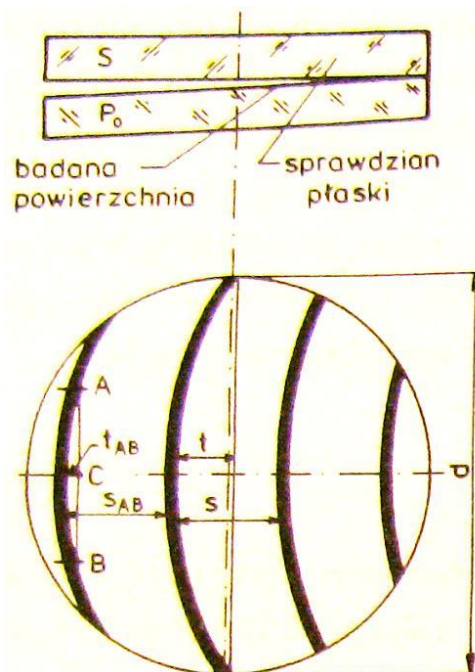
$$R = \frac{(AB)^2 s_{AB}}{4 \lambda t_{AB}} \quad (9)$$

Może okazać się, że promienie te w różnych miejscach powierzchni mają różne wartości. W dokładniejszych badaniach należy zmierzyć wartości promieni krzywizn dla różnych miejsc i dla różnych kierunków. Zależność (9) jest prawdziwa dla płaszczyzny przekroju przechodzącej przez punkty A i B, prostopadłej do badanej powierzchni.

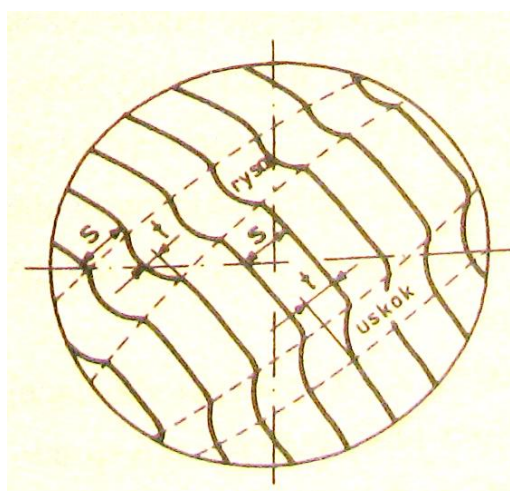
7. Głębokości rys lub uskoków (Rys. 6) najwygodniej mierzy się metodą pomiaru odstępstwa prążków od prostoliniowości ($\Delta h = \lambda t / 2s$). Należy tylko pamiętać aby prążki interferencyjne ustawić prostopadle do kierunków rys lub uskoków.

8. Rozróżnienie wklęsłości i wypukłości ma duże znaczenie podczas określania kształtu powierzchni. Statyczny obraz prążków interferencyjnych nie daje jednak pełnej informacji o kształcie badanej powierzchni. Aby określić dokładniej, gdzie występuje wklęsłość a gdzie wypukłość, należy ustalić położenie krawędzi klina powietrznego i określić, czy powierzchnia (w określonym miejscu) jest wklęsła czy wypukła. Jest to proces dwuetapowy:

- a) należy sprawdzian pochylić nieco względem badanej powierzchni i obserwować prążki (dynamiczne - przemieszczające się); i tak: jeśli podczas pochylania sprawdzianu prążki interferencyjne zagęszczają się, to ruch prążków interferencyjnych odbywa się w kierunku krawędzi klina powietrznego; jeżeli zaś odległość między prążkami zwiększa się to prążki (w obserwowanym obszarze) oddalają się od krawędzi klina;
- b) gdy prążki są skierowane stroną wklęsłą do krawędzi klina, wówczas ba dana powierzchnia jest wypukła, jeżeli wypukłą – to powierzchnia jest wklęsła (na Rys. 5 powierzchnia jest wypukła).



Rys. 5 Prążki interferencyjne tworzone przez dużą sferę.



Rys. 6 Interferogram powierzchni z rysą i uskokiem.

Powyższy dwuetapowy proces można zastąpić inną regułą. Należy lekko nacisnąć od góry na ramkę ze sprawdzianem płaskim S i obserwować ruch prążków. Prążki przesuwają się zawsze w dół nierówności powierzchni.

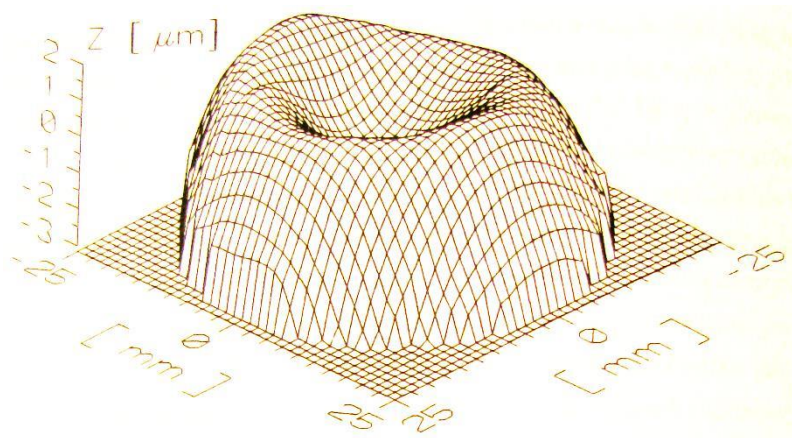
IV. Zadania do wykonania

IV.1 Pomiary

1. Należy wyznaczyć powiększenie rysowanych interferogramów w stosunku do badanych powierzchni. W tym celu między sprawdzian S i próbkę P_0 należy włożyć papier milimetrowy z zaznaczonym na nim odcinkiem (np. 4 cm). Na papierze P_a zaznacza się ten odcinek, obserwując go przez okular. Powiększenie jest to stosunek długości odcinka narysowanego na papierze P_a do długości odcinka umieszczonego tuż pod sprawdzianem.
2. Na papierze P_a rysuje się osie współrzędnych próbki, jeżeli są one na próbce zaznaczone.
3. Sprawdzian ustawia się tak, by był on równoległy do badanej powierzchni. W tym celu należy ustawić oko na wysokości badanej powierzchni. Po przyjrzeniu się próbce z różnych stron ustawia się śrubami położenie sprawdzianu. Szczelina między sprawdzianem a próbką musi być równoległa i bardzo mała (ok. 0,2 mm). Gdyby prążki nie były widoczne, powoli podnosi się stolik aż do momentu, kiedy się pojawią. Teraz śrubami pochyla się sprawdzian tak, aż prążki rozszerzą się. Jeżeli nie można dowolnie rozszerzyć prążków i ustawić krawędzi klina z dowolnej strony, należy obniżyć nieco stolik, ale tak by prążki były jeszcze widoczne. Prążki zagęszczają się. Ponownie rozszerza się prążki śrubami. Tę procedurę powtarza się aż prążki będą kontrastowe; będzie je można dowolnie rozszerzać i ustawiać klin z dowolnej strony.
4. Obserwuje się prążki dynamiczne i ustawia je w sposób optymalny, ale tak by wiedzieć, z której strony znajduje się krawędź klina (jak to opisano powyżej). Optymalne ustawienie prążków polega na tym, że najpierw należy stwierdzić, z jaką powierzchnią mamy do czynienia i jaki sposób analizy, opisany w p. III.2, byłby najodpowiedniejszy.
Dla rys i uskoków stosuje się metodę odstępstwa prążków od prostoliniowości przez ustawienie ok. 5 - 7 prążków prostopadle do rysy lub uskoku. Dla urozmaiconej powierzchni, gdy chce się rysować przekroje powierzchni, wybiera się zwykle do ok. 20 prążków w polu widzenia. W przypadku powierzchni sferycznej lub elipsoidalnej najlepiej ustawić centrum prążków w środku badanej próbki. Gdy mamy do czynienia z bardzo dużymi sferami, wybiera się metodę odstępstwa prążków od prostoliniowości przez ustawienie kilku z nich w różnych (np. dwóch prostopadłych) kierunkach.
5. Rysuje się prążki interferencyjne (prowadząc linię wzdłuż środków ciemnych prążków). Zaznacza się też, z której strony znajduje się krawędź klina.
6. Czynności opisane w punktach 2 - 5 powtarza się dla kilku próbek otrzymanych od prowadzącego zajęcia.

IV.2. Opracowanie wyników

1. Narysować profile badanych powierzchni dla przekrojów przechodzących wzdłuż osi współrzędnych próbek.
2. Przy użyciu odpowiedniego oprogramowania wykreślić „przestrzenny” obraz badanych powierzchni – jak na Rys. 7. Odpowiednio wyskalować współrzędne.
3. Określić głębokość dolin i wysokość szczytów na wykresach.
4. Dla powierzchni sferycznej należy obliczyć jej promień krzywizny. Dla powierzchni torycznych należy obliczyć ekstremalne promienie krzywizny oraz wyznaczyć kąt Θ . Dla próbek z rysami i uskokami należy obliczyć głębokości rys i uskoku.



Rys. 7 Przykład kształtu przestrzennego badanej powierzchni.

5. Ustosunkować się do otrzymanych wyników.

Uwaga: Należy przyjąć długość fali jaką emituje lampa sodowa - $\lambda = 589,3 \text{ nm}$.