

mgr inż. Bronisław BEDNARZ

ZASTOSOWANIE HOLOGRAFII
DO OKREŚLANIA TOPOGRAFII BŁEDÓW KSZTAŁTU
WYBRANYCH POWIERZCHNI CZĘŚCI MASZYN

P r a c a d o k t o r s k a

wykonana w Zakładzie Metrologii Warsztatowej
Instytutu Technologii Maszyn Politechniki Krakowskiej

P r o m o t o r

Doc. dr hab. inż. Leszek Nawara

Kraków, wrzesień 1976 r.

Motto:

"Człowiek dążący do coraz pełniejszego poznania świata, musi coraz dokładniej mierzyć otaczające go rzeczy i zjawiska i stosować coraz dokładniejsze metody i narzędzia pomiarowe".

A. Tomaszewski

Od autora

Praca niniejsza została wykonana w latach 1973 - 1976 pod naukowym kierownictwem Pana Doc. dr hab. inż. Leszka Nawary, dyrektora Instytutu Technologii Maszyn Politechniki Krakowskiej.

Część badawcza pracy została zrealizowana w Pracowni Holografii Zakładu Optyki Fizycznej, kierowanego przez Pana Doc. mgr Maksymiliana Plutę, w czasie mego pobytu na stażu naukowym w Centralnym Laboratorium Optyki w Warszawie.

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Panu Docentowi dr hab. inż. Leszkowi Nawarze na sugestię interesującego tematu przez zwrócenie mi uwagi na duże perspektywy zastosowania holografii w metrologii oraz za okazywaną mi zawsze życzliwość i pomoc.

Pragnę też złożyć gorące podziękowania Kierownikowi Pracowni Holografii Panu mgr Romualdowi Pawluczykowi za cenne i krytyczne uwagi udzielane mi w czasie realizacji zarówno teoretycznej jak i badawczej części pracy, które niewątpliwie przyczyniły się do podniesienia jej walorów, jak również wszystkim, którzy udzielali mi pomocy w czasie realizacji tej pracy.

SPIS TREŚCI

	str.
Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy . .	IV
Wykaz i określenia ważniejszych pojęć stosowanych w pracy	VI
Wprowadzenie	1
Stan zagadnienia, uzasadnienie podjęcie tematu, określenie celu i zakres pracy	3
1. ANALIZA TEORETYCZNA ZAGADNIENIA	14
1.1. Omówienie aktualnego stanu badań na podsta- wie publikowanych prac	14
1.1.1. Analiza dotychczasowych metod interferometrycznych określania topografii błędów kształtu powie- rzchni części maszyn	14
1.1.2. Analiza holograficznych metod określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszy- szyn	26
1.1.3. Warunki holograficznego porów- nywania powierzchni części ma- szyn	40
1.1.4. Krytyczna ocena dotychczasowych prac z zakresu podjętego tematu	50
1.2. Analiza czynnikowa holograficznego okreś- lenia topografii błędów kształtu powie- rzchni części maszyn	51

1.3.	Wnioski i zalecenia do badań własnych	64
1.4.	Hipotezy pracy	66
2.	BADANIA WŁASNE	67
2.1.	Badania wstępne	68
2.1.1.	Ustalanie kontrolowanych powierzchni części maszyn	68
2.1.2.	Ustalanie hologramów . .	78
2.1.3.	Wnioski	83
2.2.	Laboratoryjny model interferometru holograficznego	84
2.2.1.	Schemat układu optycznego interferometru	84
2.2.2.	Montaż interferometru . .	68
2.2.3.	Justowanie interferometru	93
2.2.4.	Naświetlanie i obróbka hologramów	97
2.3.	Badania podstawowe	99
2.3.1.	Badania dokładności interferometru holograficznego	99
2.3.2.	Badania optymalizacyjne i zakresu pomiarowego interferometru	124
2.3.2.1.	Badania rozpoznawcze . .	124
2.3.2.2.	Wnioski i zalecenia do badań właściwych	138
2.3.2.3.	Badania właściwe	139

2.4.	Lokalizacja i interpretacja prążków interferencyjnych	180
2.5.	Wpływ chropowatości oraz kąta padania na kontrast prążków interferencyjnych	193
2.6.	Pomiary błędów kształtu wybranych powierzchni	203
3.	WNIOSKI	214
3.1.	Wnioski o charakterze poznawczym	214
3.2.	Wnioski o charakterze użytkowym	217
3.3.	Wnioski dotyczące proponowanych kierunków dalszych prac	218
	Bibliografia	219
	Streszczenie	227
	Spis tablic	229
	Spis rysunków	232

Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych
w pracy

- J - rozkład intensywności interfererujących wiązek światła
- λ - długość fali emitowanego światła
- φ - kąt klina
- β - kąt padania
- $h_{p-(p-1)}$ - zmiana odchyłki kształtu badanej powierzchni
 $p-(2p-1)$ pomiędzy dwoma prążkami jasnymi $/p-(p-1)/$ oraz prążkiem jasnym i ciemnym $/p-(2p-1)/$
- $s_{p-(p-1)}$ - odległość pomiędzy dwoma prążkami jasnymi
 $p-(2p-1)$ $/p-(p-1)/$ oraz prążkiem jasnym i ciemnym $/p-(2p-1)/$
- C - kontrast prążków interferencyjnych
- A_p - amplituda fali przedmiotowej
- A_o - amplituda fali odniesienia
- φ_p - faza fali przedmiotowej
- φ_o - faza fali odniesienia
- τ - amplitudowy współczynnik przepuszczania płyty fotograficznej
- Γ - współczynnik kontrastowości emulsji fotograficznej
- X_i - zbiór czynników badanych
- Z_k - zbiór czynników wynikowych
- C_c - zbiór czynników stałych

- H_n - zbiór czynników zakłócających
- α_p - błąd poprawności interferometru holograficznego
- α_{p_4} - błąd wskazania interferometru holograficznego
- S - średni błąd kwadratowy wierności wskazań interferometru
- e - błędy graniczne wierności wskazań interferometru
- $t_{\alpha, f}$ - wartość statystyki t-Studenta na poziomie istotności α oraz f -stopni swobody
- W - zakres rozrzutu wskazań interferometru
- ϵ - względny błąd poprawności wskazań interferometru
- $R_a(R_z)$ - chropowatość badanych powierzchni
- F_{α, f_2, f_1} - wartość /statystyka Snedecora/ określona na poziomie istotności przy f_2, f_1 stopniach swobody
- b_0, b_k, b_{q_k} - współczynniki funkcji regresji
- \overline{ZP} - średni zakres pomiarowy interferometru holograficznego
- ΔK - błąd kształtu badanej powierzchni
- A - wartość odkształcenia prążka interferencyjnego
- $1/p$ - częstość przestrzenna

Wykaz i określenia ważniejszych pojęć
stosowanych w pracy

BŁĄD KSZTAŁTU - jest to odstępstwo jednego, dwóch lub kilku zarysów umownych od odpowiadających im zarysów odniesienia zachodzące na jednej powierzchni przedmiotu [29]

CZĘSTOŚĆ PRZESTRZENNA - liczba okresów funkcji harmoniczej na jednostkę długości [25]. Jest to pojęcie związane z analizą furierowską obrazów, polegająca na przedstawieniu przedmiotu w postaci sinusoidalnych siatek. Częstość przestrzenna jest odwrotnością okresu siatki i jest podawana w cyklach lub liczbą okresów siatki na $[mm^{-1}]$.

DOKŁADNOŚĆ INTERFEROMETRU HOLOGRAFICZNEGO - właściwość charakteryzująca zdolność interferometru do wskazywania wartości wielkości bliskich rzeczywistej wartości wielkości mierzonej.

B ł ą d d o k ł a d n o ś c i - wypadkowa wartość błędów interferometru w określonych warunkach użytkowania, zawierająca błędy poprawności i błędy wierności wskazań interferometru /wg PN-71/N-02050/.

FILTRACJA CZĘSTOŚCI PRZESTRZENNYCH - sposób polegający na przepuszczeniu do dalszej analizy tylko tych częstości przestrzennych, które są nośnikiem informacji o kształcie badanej powierzchni, a zatrzymaniu tych częstości przestrzennych, które niosą informację innego typu, np. o chropowatości badanej powierzchni.

FUNKCJA REGRESJI - zależność matematyczna, określająca więź pomiędzy czynnikiem wyjściowym a czynnikami badanymi [90]

HOLOGRAFIA - metoda rejestracji a następnie odtwarzania pól o własnościach falowych /fal elektromagnetycznych o różnej długości, fal akustycznych oraz fal związanych ze strumieniami

cząstek/ z zachowaniem informacji o rozkładzie ich amplitud i faz.

HOLOGRAM AMPLITUDOWY - hologram, na którym rejestracja informacji jest realizowana przez uzyskanie zmiennego zaczernienia ośrodka światłoczułego [9, 80].

HOLOGRAM FAZOWY - hologram, na którym rejestracja informacji jest realizowana przez uzyskanie zmiennego współczynnika załamania ośrodka światłoczułego lub przez odkształcenie jego powierzchni [9, 80].

INTERFEROGRAM - zapis obrazu interferencyjnego.

JUSTOWANIE - czynności mające na celu doprowadzenie narzędzia pomiarowego do poprawnego działania i prawidłowych wskazań.

KODOWANIE CZYNNIKÓW - liniowe przekształcenie przestrzeni czynnikowej przez przeniesienie początku układu współrzędnych do punktu centralnego eksperymentu i wybór podziałki na osiach współrzędnych w jednostkach zmiany czynników badanych [90].

KONTUROWANIE - metoda warstwicowego przedstawiania ukształtowania dowolnych obiektów, np. holograficzna metoda warstwicowa [12, 15, 65, 79].

METROLOGIA WARSZTATOWA - wyodrębniony dział metrologii technicznej obejmujący zagadnienia dotyczące sprawdzania i pomiarów długości, kątów i geometrii powierzchni [55].

MODEL MATEMATYCZNY - przybliżony opis matematyczny badanego obiektu [90].

ODBIELANIE - proces obróbki fotochemicznej płyty fotograficznej, polegający na zamianie rozkładu zaczernienia na rozkład wielkości współczynnika załamania emulsji oraz częściowo zmianie jej grubości [80].

PRZESTRZEŃ CZYNNIKOWA - przestrzeń wielowymiarowa, której współrzędne odpowiadają badanym czynnikom [90]

RÓWNANIE REGRESJI - matematyczny model analizowanego obiektu przedstawiony w postaci wielomianu, otrzymany na podstawie matematyczno-statystycznej analizy wyników doświadczeń [90]

TOPOGRAFIA BŁĘDÓW KSZTAŁTU POWIERZCHNI CZĘŚCI MASZYN - metoda sporządzania szczegółowej mapy topograficznej błędów kształtu powierzchni części maszyn. Cechą charakterystyczną takiej mapy, jest to, że można z niej z dużą dokładnością określić ilościowo wartości błędów kształtu w dowolnym punkcie badanej powierzchni

WIĄZKA ŚWIATŁA PRZEDMIOTOWA - wiązka światła przenosząca informacje o przedmiocie

WIĄZKA ŚWIATŁA ODNIESIENIA - wiązka światła przechodząca poza badanym obiektem nakładana na wiązkę przedmiotową w płaszczyźnie płyty fotograficznej /hologramu/ w celu zamiany informacji fazowej na informację przestrzenną w postaci zmiany natężenia pola.

WIERNOŚĆ INTERFEROMETRU HOLOGRAFICZNEGO - właściwość charakteryzująca zdolność interferometru do dawania zgodnych pomiędzy sobą wskazań dla tej samej wartości wielkości mierzonej nie biorąc pod uwagę błędów systematycznych o wartościach zmiennych

B ł ą d w i e r n o ś c i - jeden ze wskaźników rozrzutu wskazań interferometru. Przyjmuje się zwykle odchylenie średnie kwadratowe pojedynczego wskazania w danej serii wskazań, które nazywa się wówczas "ŚREDNIMI BŁĘDAMI KWADRATOWYM WIERNOŚCI WSKAZAŃ" dla serii kolejnych wskazań w określonych warunkach użytkowania interferometru /wg PN-71/N-02050/

WYDAJNOŚĆ DYFRAKCYJNA - stosunek natężenia ugiętej wiązki światła do natężenia odtwarzającej wiązki światła [9]

OPTYMALNE WARUNKI - odpowiednie skojarzenie czynników badanych, pozwalające uzyskać żądane wartości parametru wyjściowego [90]

PINHOL - diafragma z małym otworem o średnicy 10 ± 30 [μm] dopasowanej do średnicy zogniskowanej wiązki laserowej

PLANOWANIE DOŚWIADCZEŃ - jedna z gałęzi matematycznej teorii eksperymentu, obejmująca całokształt zagadnień związanych z organizacją eksperymentu czynnego [90]

PLANOWANIE ROTOTABILNE - planowanie eksperymentów, pozwalające otrzymać równanie regresji z minimum wariancji w równych odległościach od punktu centralnego eksperymentu, we wszystkich kierunkach przestrzeni czynnikowej [90]

POLARYZATOR - element optyczny, służący do polaryzacji światła

POPRAWNOŚĆ INTERFEROMETRU HOLOGRAFICZNEGO - właściwość charakteryzująca zdolność interferometru do wskazywania poprawnych wielkości mierzonej bez uwzględnienia błędów wierności wskazań

B ł ą d p o p r a w n o ś c i - suma algebraiczna błędów systematycznych obciążających wskazania interferometru w określonych warunkach użytkowania /wg PN-71/N-02050/

POWIERZCHNIA ROBOCZA - powierzchnia, która bezpośrednio przejmuje podstawowe efekty użytecznego współdziałania z innymi zespołami, elementami składowymi lub płynem roboczym [29]

PÓLFALÓWKA - element optyczny, który zmienia światło spolaryzowane liniowo z tym, że kierunek polaryzacji światła wychodzącego otrzymuje się przez odbicie kierunku polaryzacji światła padającego w stosunku do jednej z osi optycznych [14]

PRZEPUSZCZALNOŚĆ AMPLITUDOWA - stosunek amplitudy monochromatycznego światła po i przed przejściem przez warstwę fotograficzną [9]

W p r o w a d z e n i e

Jednym z etapów procesu obróbkowego obrabianego przedmiotu jest kształtowanie - czyli nadawanie temu przedmiotowi określonych cech geometrycznych, takich jak kształt oraz wymiary. Istotne znaczenie związane z procesem kształtowania ma zagadnienie dotyczące wyznaczania błędów kształtowania. Przy stale zwiększającej się dokładności wytwarzania części maszyn i przyrządów oraz szybkim rozwojem postępu technicznego zagadnienie to nabrało szczególnego znaczenia. Jednym z zasadniczych źródeł występowania błędów kształtowania jest niedokładność metod i narzędzi pomiarowych. Niedokładne wyniki pomiarów mogą być przyczyną wielu zakłóceń w produkcji, błędnych wniosków wyciąganych z badań itd. Wynika stąd duże znaczenie pomiarów w technice wytwarzania.

Wzrastające wymagania odnośnie dokładności wytwarzania w budowie maszyn stały się bodźcem do opracowywania nowych metod pomiarowych, rozszerzania zakresu pomiarów oraz zwiększania ich dokładności. Wymagają tego potrzeby gospodarcze i współczesne osiągnięcia nauki i techniki.

Duże znaczenie w metrologii warsztatowej ma określanie błędów kształtu powierzchni części maszyn. Błędy te między innymi warunkują wielkość miejscowych nacisków rzeczywistych, grubości warstw smaru, luzy pomiędzy współpracującymi powierzchniami, opory ruchu w połączeniach ruchomych, szczelność połączeń, niezawodność, drgania itd. Błędy kształtu, szczególnie powierzchni roboczych, mają istotny wpływ na jakość obrabianego przedmiotu, a tym samym na właściwe współdziałanie stykających się powierzchni części maszyn w czasie pracy.

Do określania niedokładności kształtu powierzchni części maszyn są stosowane różne metody. Dobiera się je w zależności od wymagań technologicznych. Tolerancje kształtu ustalane dla części maszyn o wymaganej dużej dokładności kształtu są bardzo wąskie. Utrudnia to określanie niedokładności kształtu powierzchni takich części. Brak też wystarczająco dokładnych do tego celu metod i aparatury pomiarowej, która mogłaby sprostać tym zadaniom.

Jedną z najdokładniejszych stosowanych dotychczas metod określania niedokładności kształtu powierzchni części maszyn jest metoda interferometryczna. Mimo jednak znacznego rozpowszechnienia tej metody w technice, nie znalazła ona to tej pory szerszego zastosowania w metrologii warsztatowej.

W ostatnich latach nastąpił szybki rozwój holograficznych metod interferometrycznych, które umożliwiły znaczne rozszerzenie zastosowania metod interferometrii klasycznej. Już obecnie daje się zauważyć szybki rozwój metod interferometrii holograficznej w takich dziedzinach, jak: analiza naprężeń i drgań, pomiary odkształceń, temperatury itp. Rozpatrując falę zrekonstruowaną, jako wzorcową falę odniesienia można dokonać porównania tej fali z falą odbitą od innej powierzchni w sposób analogiczny do klasycznego układu interferometrycznego. Można w ten sposób wyznaczyć topografię błędów kształtu badanej powierzchni.

Metoda interferometrii holograficznej umożliwia rozszerzenie metody interferometrii klasycznej w metrologii warsztatowej przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn. Podjęcie w tym kierunku prac jest zatem w pełni uzasadnione.

S t a n z a g a d n i e n i a, uzasadnienie podjęcia tematu, określenie celu i zakresu pracy.

S t a n z a g a d n i e n i a

Istnieje wiele metod określania błędów kształtu powierzchni części maszyn, przy czym najbardziej informatywnymi i kompleksowymi są metody warstwiczne, tzn. metody, które umożliwiają sporządzanie topografii błędów kształtu badanych powierzchni części maszyn. Właśnie ta metoda jest tematem niniejszej pracy.

Ocena stanu zagadnienia związanego z tematem pracy będąca podstawą uzasadnienia celu i zakresu pracy przeprowadzona zostanie w aspekcie:

- dotychczasowych metod określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn w metrologii warsztatowej oraz
- holograficznych metod interferometrycznych pod kątem ich zastosowania do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn w metrologii warsztatowej.

Określanie topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn można przeprowadzać kilkoma metodami [29, 36, 38, 39, 40, 55, 60, 74, 75], które poniżej zostaną pokrótce omówione.

1. Metoda pozornych przekrojów [29, 55].

Metoda ta polega na określaniu nieprostoliniowości w różnych płaszczyznach poziomych przekrojów na kontrolowanej płaszczyźnie. W celu uzyskania topografii błędów kształtu kontrolowanej powierzchni, należy ją us-

tawić w poziomie, gdyż w innym przypadku dla uzyskania poprawnych wartości musi się dokonać niezbędnych przeliczeń. Tok postępowania przy określaniu topografii błędów kształtu kontrolowanej powierzchni tą metodą jest przedstawiony w pracach [29, 55]. Błąd pomiaru jak również zakres pomiarowy jest uzależniony od przyjętej metody określania nieprostoliniowości [29, 36, 38, 39, 40, 55, 60]. Metoda ta pozwala na przedstawienie błędów kształtu badanej powierzchni w postaci planu warstwicowego. Chociaż warstwicowy sposób przedstawiania błędów kształtu jest bardzo informatywny, gdyż umożliwia określanie dopuszczalnych wartości błędów kształtu na całej kontrolowanej powierzchni, to jednak sporządzanie takiego planu jest bardzo pracochłonne, tym bardziej, że dla każdej badanej powierzchni tok postępowania należy za każdym razem powtórzyć. Ponadto metodę poziomych przekrojów stosuje się obecnie tylko do określania niepłaskości powierzchni.

2. Metoda farbowania, znana szeroko pod nazwą metody tuszowania [29, 36, 38, 39, 40, 55, 59, 60]. Metoda ta, stosowana do określania niepłaskości powierzchni oraz do określania dokładności powierzchni stożkowych [59], polega na pokryciu badanej powierzchni lub powierzchni wzorcowej określonej grubości warstwą substancji o kontrastowym zabarwieniu, zwanej dalej tuszem, i roztarciu jej między tymi powierzchniami. W wyniku roztarcia tuszu następuje uwydatnienie wzniesień nierówności w postaci metalicznych plam na tle powierzchni badanego przedmiotu pokrytego tuszem, co pozwala na ilościowe lub jakościowe [28] określenie błędów kształtu badanej powierzchni. Jest to więc w zasadzie metoda dwuwarstwowa, w której jedna warstwa ma postać metalicznych plam - są to maksymalne wzniesienia na powierzchni, drugą natomiast warstwę

stanowi pozostała powierzchnia pokryta tuszem. Należy zaznaczyć, że cechą charakterystyczną tej metody jest to, że otrzymanie poprawnych wyników określających niedokładność badanej powierzchni, jest uzależnione od możliwości uzyskania odpowiednich grubości nałożonego a następnie rozartego tuszu i ich pomiarów [59].

3. Metoda mularowych prążków [15, 23, 29, 63, 72].

Efekt mularowy polega na powstawaniu prążków przy nałożeniu dwóch mularowych siatek liniowych. Jeżeli nałożone na siebie liniowe siatki o tych samych stażach tworzą ze sobą niewielki kąt, wówczas efekt mularowy będzie widoczny w postaci równoległych ciemnych i jasnych prążków, przy czym ich zagęszczenie będzie zależało od kąta, jaki tworzą ze sobą te dwie siatki. Im mniejszy będzie ten kąt, tym większa będzie odległość pomiędzy prążkami. Podobny efekt można uzyskać nakładając na siebie dwie siatki o różnych, niewiele różniących się stażach, tak aby ich linie były równoległe. W tym przypadku odległość pomiędzy prążkami zależy jedynie od stażach siatek. Określanie błędów kształtu płaszczyzn metodą mularowego efektu jest następujące; Jedną z siatek naklejamy lub наносimy jej obraz na badaną powierzchnię. Na skutek błędów kształtu powierzchnia geometryczna tej siatki ulegnie zniekształceniu, co w połączeniu z drugą kontrolną siatką spowoduje określone adekwatne do błędów kształtu badanej powierzchni ukształtowanie mularowych prążków, z których można określić w prosty sposób błędy kształtu badanej powierzchni. Przy badaniu błędów kształtu powierzchni zwierciadlanych siatkę można nałożyć na badaną powierzchnię pod niewielkim kątem, wówczas rolę drugiej siatki spełnia cień siatki nałożonej na badaną powierzchnię. Błąd pomiaru tą metodą zależy głównie od stażach siatki i wynosi ok. $0,1 + 0,2$ stażach siatki [29]. Metoda ta pozwala na pomiar odchyłek od $2 \mu\text{m}$ [29]. Przykłady sporządzania konturo-

wych map powierzchni metodą muarowego efektu przedstawiono w pracy [23].

4. Metoda interferencyjna [29, 36, 38, 39, 40, 55, 60, 74, 75].

Jedną z najdokładniejszych metod określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, jak już wspomniano, jest metoda interferometryczna. Różnorodnie ukształtowane prążki interferencyjne przedstawiają błędy kształtu badanej powierzchni - podobnie jak warstwice na mapie przedstawiają urzeźbienie terenu. Pomimo wielu zalet metody interferometrycznej określania topografii błędów kształtu powierzchni, zastosowanie jej w metrologii warsztatowej jest ograniczone. Metodę tę stosuje się na ogół [29, 55]:

- 1/ do pomiaru niepłaskości stołów i końcówek pomiarowych, płytek wzorcowych oraz innych płaskich powierzchni, o odpowiednio niskiej chropowatości $R_a = 0,00 \pm 0,025 [\mu\text{m}]$ i wysokiej refleksyjności, których błąd płaskości nie przekracza $2 \mu\text{m}$; pomiary te wykonuje się za pomocą szklanych lub kwarcowych płytek interferencyjnych [29, 36, 38, 39, 40] oraz
- 2/ do pomiaru niepłaskości płaszczyzn przewodnic obrabiarek o długości od $500 \pm 1200 [\text{mm}]$ i szerokości do $100 [\text{mm}]$ za pomocą interferometru Ebenheitmessgerät 12 [29, 40].

Przy pomiarze niepłaskości za pomocą płytek interferencyjnych, które służą do wytwarzania fali wzorcowej, pomiar odbywa się metodą dotykową. Prowadzi to do mechanicznego wycierania i zużywania się wzorcowych powierzchni pomiarowych płytki, co z kolei wprowadza do wyniku pomiaru dodatkowe błędy oraz powoduje, że obraz prążków interferencyjnych jest nieostry, rozmazany, a nawet całkowicie zanika. Interferometry nato-

miast są wyposażone we wzorce, które muszą być bardzo dokładnie justowane. Justowanie to może przeprowadzić w zasadzie tylko wytwórca, który zajmuje się ich produkcją. Justowanie wzorca jak również całego przyrządu przez użytkownika po rozjustowaniu jest bardzo kłopotliwe i praktycznie niemożliwe. Wynika stąd, że zastosowanie metody interferometrii klasycznej jest do tej pory w metrologii warsztatowej ograniczone tylko do określania topografii błędów kształtu powierzchni płaskich a wymienione powyżej wady, jak i wiele innych ograniczeń uniemożliwiają szersze zastosowanie tej metody.

Określaniu niedokładności kształtu powierzchni części maszyn przez sporządzanie topografii błędów kształtu badanych powierzchni metodami interferometrycznymi poświęcona w literaturze niewiele uwagi, mimo to jednak są one z wielu względów metodami o dużej perspektywie i posiadają przewagę nad wymienionymi innymi. W związku z rozwojem w ostatnich latach holografii, metodę interferometryczną można bowiem rozszerzyć do bardziej ogólnego przypadku badania powierzchni trójwymiarowych np.: walcowych zewnętrznych i wewnętrznych, stożkowych, kulistych itp. powierzchni w klasach dokładności kształtu od I do VI [29]. Już obecnie podejmowane są próby zastosowania interferometrii holograficznej do określania topografii błędów kształtu powierzchni cylindrycznych [1,2] oraz do badania sferycznych powierzchni optycznych /soczewek/.

Holograficzne metody interferometryczne posiadają nie tylko zalety interferometrii klasycznej lecz pozwalają dodatkowo wyeliminować jej wady, a między innymi doprowadzić do :

- rozszerzenia zakresu pomiarowego kontrolowanych błędów kształtu /przy użyciu płytek interferen-

cyjnych do 2 [μm] [55] ,

- rozszerzenia zakresu chropowatości kontrolowanych powierzchni /przy użyciu płytek interferencyjnych do $R_a = 0,025$ [μm]/,
- rozszerzenia jej do bardziej ogólnego przypadku powierzchni trójwymiarowych.

Widać z tego krótkiego opisu, że metodzie interferometrycznej z uwzględnieniem metod interferometrii holograficznej powinno poświęcać się w metrologii warsztatowej więcej uwagi niż do tej pory. Na podkreślenie tego przytoczono poniżej zestawienie najistotniejszych zalet interferometrycznego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, mianowicie:

- W przeciwieństwie do punktowych metod pomiaru metoda ta umożliwia określanie wartości błędów kształtu na całej kontrolowanej powierzchni, co pozwala przy jednym tylko pomiarze kompleksowo ocenić całą badaną powierzchnię, dzięki temu pomiar taki jest pozbawiony wielu błędów, np. postępowania, odczytania itp. błędów, których nie można uniknąć w przypadku stosowania punktowych metod pomiaru;
- Na podstawie sporządzonej topograficznej mapy błędów kształtu badanej powierzchni części maszyn możemy dokładnie określić miejsca najbardziej zużywające się oraz przeprowadzić ich analizę, np. przeprowadzając dla powierzchni walcowej przekroje wzdłuż tworzącej i prostopadle do osi możemy przeprowadzić bardzo dokładną analizę zużycia się poszczególnych miejsc na powierzchni badanej;
- Topografia błędów kształtu kontrolowanej powierzchni pozwala na dokładne zlokalizowanie na całej badanej powierzchni miejsc o największych błędach.

- dach kształtu, co ułatwia usuwanie błędów wykonania;
- W przeciwieństwie do metod dotykowych pomiaru nie powoduje ona deformacji powierzchni w czasie pomiarów.
 - Holograficzne metody interferometryczne w przeciwieństwie do metody interferometrii klasycznej umożliwiają określanie topografii błędów kształtu nie tylko powierzchni płaskich, można je zastosować do bardziej ogólnego przypadku powierzchni trójwymiarowych.
 - W interferometrii klasycznej każdy interferometr musi posiadać swój wzorzec, a w interferometrze holograficznym wystarczy jeden wzorzec dla całej rodziny interferometrów.
 - W określonych warunkach metody te umożliwiają rozszerzenie zakresu pomiarowego, który obejmie trzy wcześniej opisane metody, tzn. metodę pozornych przekrojów, metodę farbowania oraz metodę murarowych prążków w wyniku czego mogą one być zastąpione w niektórych przypadkach metodami holograficznymi.

U z a s a d n i e n i e p o d j ę c i a t e m a t u

Z przeprowadzonej poprzednio oceny stanu zagadnienia metod określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn wynika, że najdokładniejszą metodą określania topografii błędów kształtu powierzchni jest metoda interferometryczna. Rozwój holograficznych metod interferometrycznych w ostatnich latach nie znalazł jeszcze należytego odzwierciedlenia w metrologii warsztatowej. Problem ten nie został jeszcze rozpracowany dostatecznie i kompleksowo, chociaż wszędzie podkreśla się, że znaczenie jego dla określania topografii błędów kształtu powierzchni roboczych części maszyn jest zasadnicze i perspektywiczne, co potwierdza słuszność podjęcia takiego tematu pracy.

C e l p r a c y

Celem pracy jest:

1. Zastosowanie interferometrii holograficznej do określania topografii błędów kształtu wybranych powierzchni roboczych części maszyn o podwyższonej dokładności kształtowania.
2. Określenie dokładności laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego, zastosowanego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn.
3. Optymalizacja warunków holograficznego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn.

4. Określenie zakresu pomiarowego laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego, zastosowanego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn.

Z a k r e s r e a l i z a c j i p r a c y

Z uwagi na podstawowy charakter zagadnienia praca stanowić będzie próbę zastosowania interferometrii holograficznej do określania topografii błędów kształtu wybranych powierzchni części maszyn. Badania wstępne, tzn. realizacja podstawowego celu pracy, prowadzone będą na stanowisku badawczym zestawionym z podzespołów produkowanych w Polskich Zakładach Optycznych, zestawów holograficznych ZHL-7030 oraz ZHB-7031, z użyciem lasera He-Ne oraz z dodatkowego niezbędnego wyposażenia, które nie wchodzi w skład wyposażenia zestawów holograficznych. Po zrealizowaniu podstawowego celu pracy i uwzględnieniu wniosków uzyskanych z badań, na bazie zestawionego stanowiska badawczego opracowany zostanie laboratoryjny model interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu wybranych powierzchni części maszyn. Badania prowadzone będą w normalnych warunkach na powierzchniach płaskich - wymiar 90×90 [mm], docieranych w zakresie chropowatości $Ra = 0,003 \pm 0,147$ [μm].

Zakres badań:

- I. Określenie adekwatności holograficznej metody wyznaczania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn /zestawionego stanowiska badawczego/.
- II. Określenie poprawności, wierności oraz dokładności laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego używanego do badań oraz wyznaczania topografii błędów kształtu powierzchni próbek.

III. Określenie optymalnych wartości czynników badanych przez maksymalizację kontrastu prążków interferencyjnych.

IV. Określenie zakresu pomiarowego laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego w funkcji czynników badanych.

V. Ponadto zakres pracy obejmuje:

a/ Konstrukcję i badania przyrządu do ustalania próbek /powierzchni badanych/ na interferometrze holograficznym,

b/ Konstrukcja i badania przyrządu do ustalania hologramów na interferometrze holograficznym,

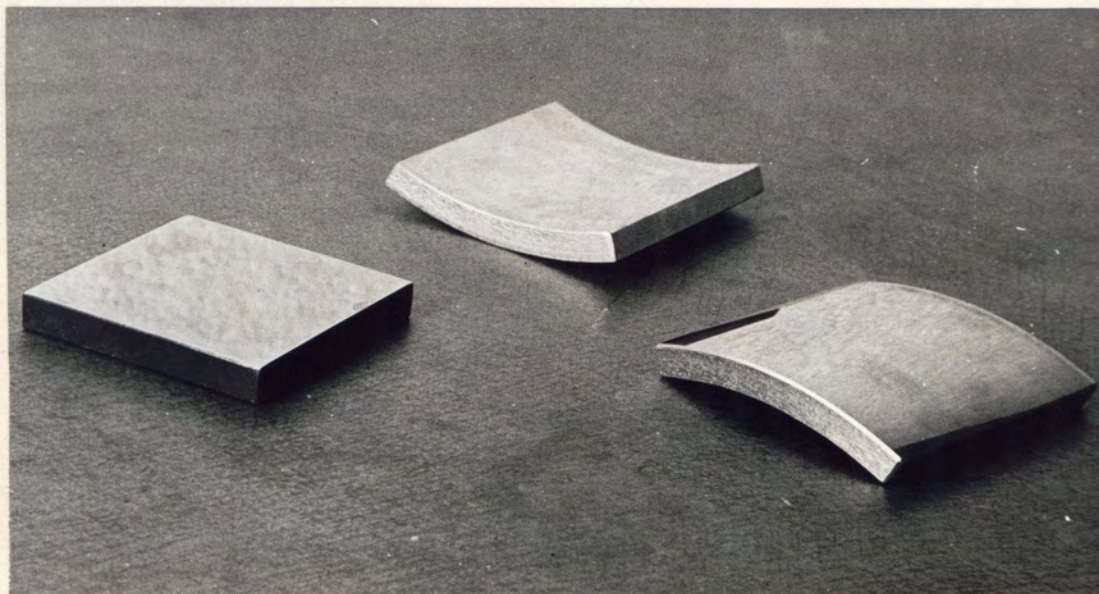
c/ Pomiar błędów kształtu wybranych powierzchni /rys. 1/:

- płaszczyzn

- wycinków zewnętrznych powierzchni walco-
wych

- wycinków wewnętrznych powierzchni walco-
wych

z uwzględnieniem błędów dokładności wskazań interferometru holograficznego. Jako wzorzec płaszczyzny przyjęto powierzchnię płaską, której chropowatość nie przekracza $R_a = 0,003 [\mu\text{m}]$, niepłaskość $1/10\lambda$ na całej powierzchni. Wzorzec został wykonany w Centralnym Laboratorium Optyki.



Rys. 1. Próbki do badań

1. ANALIZA TEORETYCZNA ZAGADNIENIA

1.1. Omówienie aktualnego stanu badań na podstawie publikowanych prac

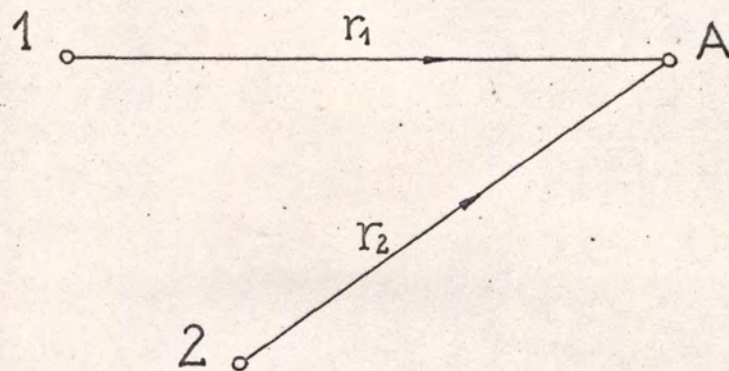
W pierwszej części tego rozdziału p. 1.1.1. zostaną przedstawione w sposób ilościowy podstawy fizyczne interferencji światła związane bezpośrednio z opracowanym zagadnieniem oraz przeprowadzona zostanie analiza dotyczących metod interferometrycznych stosowanych w metrologii warsztatowej. Opracowanie to stanowić będzie wprowadzenie w zagadnienie związane bezpośrednio z analizą holograficznych metod określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn.

1.1.1. Analiza dotyczących metod interferometrycznych określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn

Ilościowe ujęcie zjawiska interferencji światła jest przedstawione w licznych opracowaniach książkowych jak również specjalistycznych publikacjach zarówno krajowych [14, 25, 71, 80] jak i zagranicznych [5, 16, 44], dlatego nie wydaje się tutaj celowe szczegółowe jego omawianie. Niemniej jednak, aby dalsze zagadnienia związane z badawczą częścią pracy były lepiej zrozumiałe, zostaną przedstawione pewne ilościowe związki opisujące interferencję światła. Związki te zostaną przedstawione dla dwóch punktowych monochromatycznych wzajemnie spójnych źródeł światła, przy założeniu, że fazy początkowe fal świetlnych wysyłanych z obu tych źródeł są jednakowe, czyli $\Delta\varphi = 0$. Ponadto zało-

żymy, że interferencja odbywa się w powietrzu, wówczas współczynnik załamania ośrodka można przyjąć za równy jedności.

Najprostszy układ do analizy interferencji światła jest pokazany na rys. 2, na którym są przedstawione dwa punktowe wzajemnie spójne źródła światła 1 i 2. Ze źródeł tych wychodzą promienie świetlne w różnych kierunkach. Dwa z tych promieni o długościach dróg optycznych odpowiednio równych r_1 i r_2 spotykają się w punkcie A.



Rys. 2. Schemat układu do analizy interferencji światła

Równanie interferencji promieni spotykających się w punkcie A zgodnie z [25] przy powyższych założeniach ma postać:

$$J_A = J_1 + J_2 + 2 \sqrt{J_1 J_2} \cos \frac{2\pi \Delta}{\lambda} \quad /1.01./$$

gdzie:

J_A - wypadkowa intensywność w punkcie A promieni świetlnych wychodzących ze źródeł 1 i 2,

J_1, J_2 - intensywność odpowiednich promieni wychodzących ze źródeł światła 1 i 2,

$\Delta = r_2 - r_1$ - różnica dróg optycznych promieni wychodzących ze

źródła 1 i 2 i dochodzących do punktu A,

λ - długość fali emitowanego światła przez źródła 1 i 2.

Z przebiegu funkcji wynika, że w polu interferencyjnym zgodnie z zależnością /1.01./ powstanie określony rozkład intensywności światła dochodzącego ze źródeł 1 i 2, posiadający ekstremalne wartości.

Jeżeli różnica dróg optycznych promieni docierających z tych źródeł równa się parzystej wielokrotności połowy długości fali $\lambda/2$, to natężenie pola interferencyjnego przyjmuje wartości maksymalne, czyli

$$J_{A \text{ max}} = J_1 + J_2 + 2 \sqrt{J_1 J_2} \quad /1.02./$$

dla

$$\Delta = r_2 - r_1 = 2p \frac{\lambda}{2} \quad p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Przez miejsca geometryczne punktów o maksymalnej intensywności dla danej wartości p przebiegać będzie jasny prążek.

Jeżeli różnica dróg optycznych rozważanych promieni równa się nieparzystej wielokrotności połowy długości fali $\lambda/2$, to natężenie pola interferencyjnego przyjmuje wartości minimalne czyli

$$J_{A \text{ min}} = J_1 + J_2 - 2\sqrt{J_1 J_2} \quad /1.03./$$

dla

$$\Delta = r_2 - r_1 = (2p - 1) \frac{\lambda}{2} \quad p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Przez miejsca geometryczne punktów o minimalnej intensywności dla danej wartości p przebiegać będzie ciemny prążek.

Z uzyskanych obrazów prążków interferencyjnych można odczytać różnice pomiędzy falami interferującymi. W przypadku określania topografii błędów kształtu powierzchni

części maszyn fale te są odwzorowywane; jedna na powierzchni wzorcowej nazwana dalej falą wzorcową, druga na powierzchni badanej nazwana dalej falą badaną.

Różnorodne kształty prążków interferencyjnych odtwarzające błędy kształtu badanej powierzchni, podobnie jak warstwy na mapie odtwarzające urzeźbienie terenu, są miejscem geometrycznym punktów o jednakowej długości drogi optycznej. Dwa sąsiednie prążki będą przechodziły przez obszar powierzchni kontrolowanej, dla których różnica wysokości nierówności zależy od długości fali użytego światła oraz kąta padania może zmieniać się od $\lambda/2$ do kilku μm . Są to tzw. prążki jednakowej grubości [5, 55, 71].

Zbiór prążków interferencyjnych, z których składa się topograficzna mapa błędów kształtu badanej powierzchni, jest właśnie zbiorem prążków jednakowej grubości. Dlatego analiza teoretyczna tworzenia się takich prążków pozwoli ustalić pewne zależności, które z metrologicznego punktu widzenia mają istotny wpływ przy określaniu błędów kształtu powierzchni. Ponadto zagadnienie to, które rozważymy dla interferometrii klasycznej, jest identyczne i w przypadku interferometrii holograficznej.

Zakładamy jak poprzednio, że interferencja pomiędzy dwoma powierzchniami odbywa się w powietrzu /dlatego w rozważaniach tych nie będzie uwzględniona zmiana różnicy fazy o $\lambda/2$ /. Schemat tworzenia się prążków interferencyjnych jednakowej grubości jest przedstawiony na rys. 3.

Interferującymi ze sobą promieniami są: promień a - odbity od powierzchni wzorcowej oraz promień b - odbity od powierzchni badanej. Różnica dróg optycznych promieni a i b wynosi:

$$\Delta = BC + BD$$

Dla uproszczenia rozważań, nie popełnimy dużego błędu, jeżeli założymy, że

$$BC = BD = h \cos \beta$$

gdzie:

h - odległość punktu A leżącego na powierzchni wzorcowej od punktu B leżącego na powierzchni badanej

Jeżeli różnica dróg optycznych równa się parzystej wielokrotności $\lambda/2$, to jak wiadomo powstanie prążek jasny:

$$\Delta = 2p \frac{\lambda}{2} = 2h \cos \beta \quad p = 1, 2, 3, \dots$$

czyli dla prążka jasnego otrzymamy:

$$h_{2p} = \frac{p \lambda}{2 \cos \beta} \quad /1.04./$$

Jeżeli natomiast różnica dróg optycznych równa się nieparzystej wielokrotności $\lambda/2$, to powstanie prążek ciemny:

$$\Delta = (2p - 1) \frac{\lambda}{2} = 2h \cos \beta \quad p = 1, 2, 3, \dots$$

czyli dla prążka ciemnego otrzymamy:

$$h_{(2p-1)} = \frac{(2p - 1) \lambda}{4 \cos \beta} \quad /1.05./$$

Powstanie dwóch sąsiednich prążków jasnych dla powierzchni A i B /rys. 4/ jest związane ze zmianą odchyłki kształtu o wartość:

$$\Delta h_{p-(p-1)} = \frac{p \lambda}{2 \cos \beta} - \frac{\lambda(p-1)}{2 \cos \beta} = \frac{\lambda}{2 \cos \beta}$$

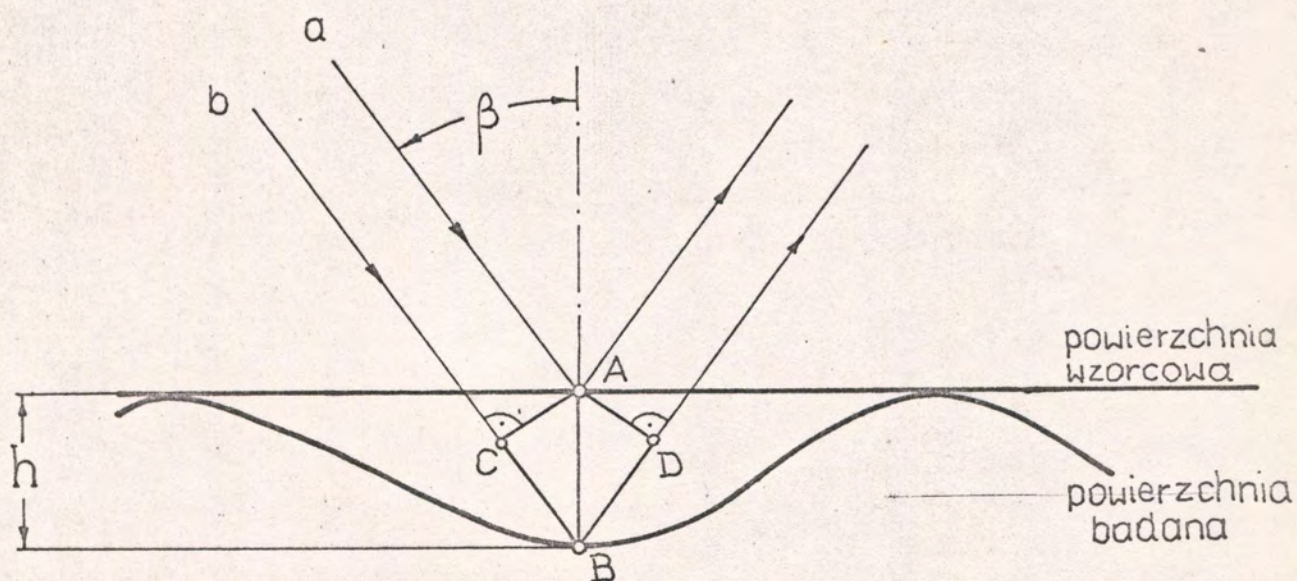
$$\Delta h_{p-(p-1)} = \frac{\lambda}{2 \cos \beta} \quad /1.06./$$

Powstanie kolejnych prążków jasnego i ciemnego między powierzchniami A i B /rys. 4/ jest związane ze zmianą odchyłki kształtu o wartość:

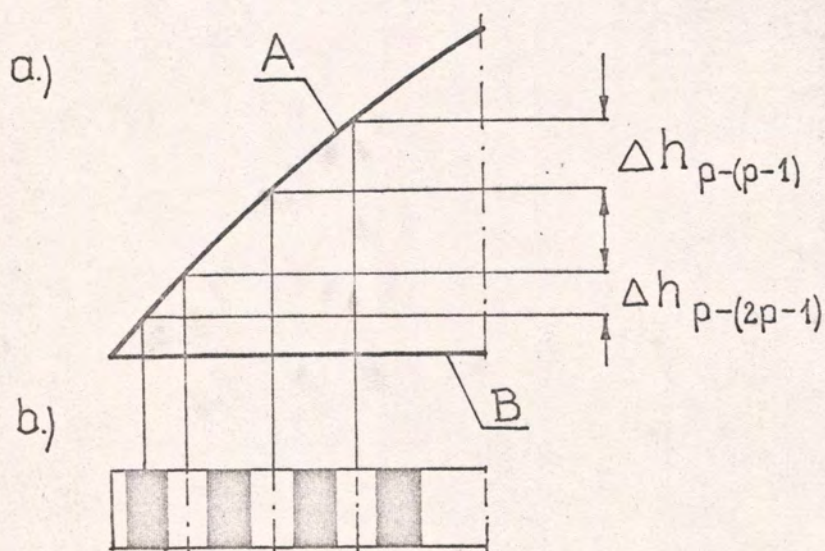
$$\Delta h_{p-(2p-1)} = \frac{p \lambda}{2 \cos \beta} - \frac{(2p-1) \lambda}{4 \cos \beta} = \frac{\lambda}{4 \cos \beta}$$

$$\Delta h_{p-(2p-1)} = \frac{\lambda}{4 \cos \beta}$$

/1.07./



Rys. 3. Powstawanie prążków interferencyjnych jednakowej grubości



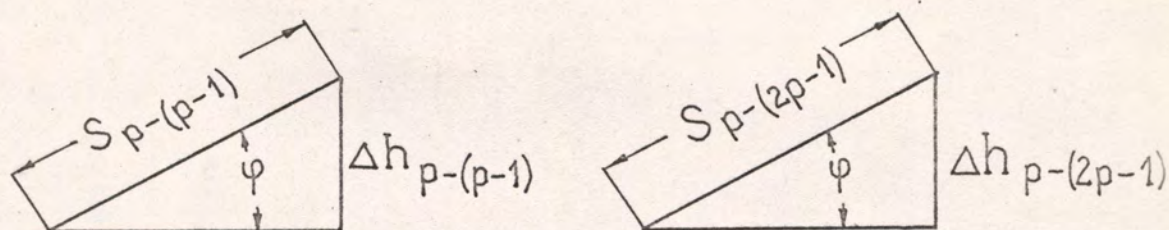
Rys. 4. Schemat do analizy zmiany odchyłki kształtu pomiędzy powierzchniami A i B /przedstawiono tylko część powierzchni A i B/: a/ rozpatrywane powierzchnie A i B, b/ obraz prążków interferencyjnych

Z zależności /1.06./ i /1.07./ widać, że zmiana odchyłki kształtu między dwoma sąsiednimi prążkami zależy:

- od długości fali użytego światła, oraz
- od kąta padania wiązki światła na rozpatrywaną powierzchnię.

Widać też, że przy innym niż normalny do powierzchni kierunku oświetlenia badanej powierzchni, czułość metody interferometrycznej maleje $1/\cos\beta$ razy.

Odległość między dwoma sąsiednimi prążkami można wyznaczyć z prostej zależności [55]. Z uwagi na stałą odległość pomiędzy prążkami rozważania wygodnie będzie przeprowadzić dla klina utworzonego między interferującymi powierzchniami /rys. 5/.



Rys. 5. Schemat do wyznaczania odległości między:
 a/ prążkiem jasnym i jasnym,
 b/ prążkiem jasnym i ciemnym.

Mamy wówczas:

$$S_{p-(p-1)} = \frac{\Delta h_{p-(p-1)}}{\sin \varphi} = \frac{\lambda}{2 \sin \varphi \cos \beta} \quad /1.08./$$

oraz odpowiednio:

$$S_{p-(2p-1)} = \frac{\Delta h_{p-(2p-1)}}{\sin \varphi} = \frac{\lambda}{4 \sin \varphi \cos \beta} \quad /1.09./$$

gdzie:

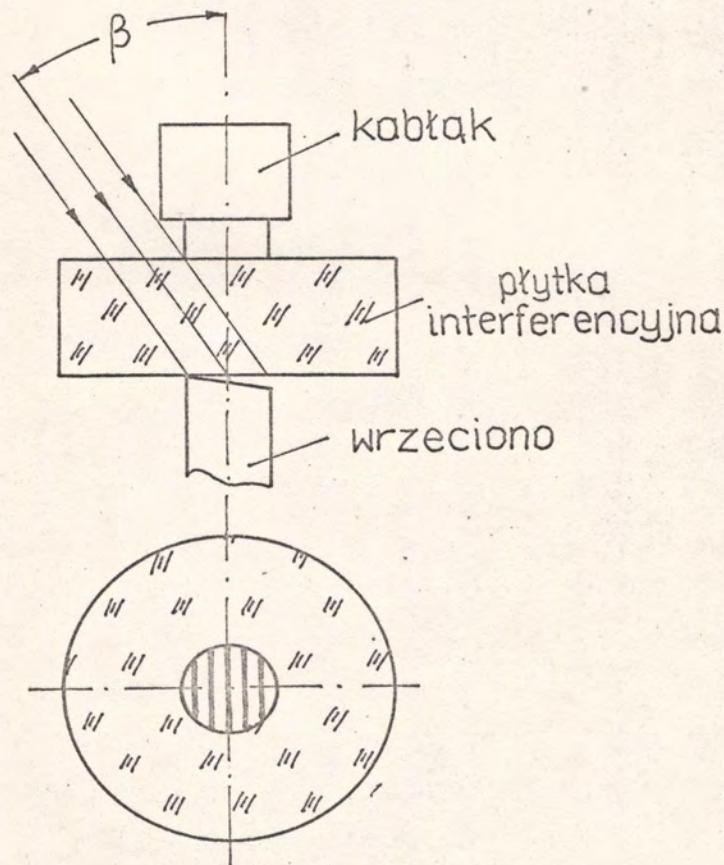
φ - kąt klina

Znajomość minimalnej odległości między dwoma sąsiednimi prążkami umożliwia wyznaczenie zakresu pomiarowego interferometru stosowanego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, co wiąże się bezpośrednio z możliwością określania maksymalnych błędów kształtu metodą interferometryczną. Zakres pomiarowy stanowi bardzo ważną własność metrologiczną narzędzi pomiarowych i choć jest to zagadnienie ważne, do tej pory nie zostało ono wyczerpująco omówione w literaturze. Odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi prążkami o tej samej intensywności wg [55] powinna być taka, aby obraz tych prążków był dostatecznie wyraźny tzn. prążki te można było odróżnić przy obserwacji nieuzbrojonym okiem. Odległość ta wg [55] powinna wynosić $S_{p-(p-1)} \geq 2$ [mm]. Brak natomiast prac poświęconych określeniu czynników, które mają wpływ na kontrast prążków interferencyjnych, który pozostaje w bezpośrednim związku ze zdolnością rozdzielczą /widzialnością prążków/. Wynika to może z wąskiego zakresu zastosowania interferometrii w technologii maszyn do określania topografii błędów kształtu powierzchni, które głównie są ograniczone do pomiaru niepłaskości przy użyciu płytek interferencyjnych. Przy takich pomiarach, o czym już wcześniej wspomniano, powierzchnie muszą odznaczać się dużą refleksyjnością [36], tzn. muszą to być powierzchnie o małej chropowatości, np. powierzchnie miernicze płytek wzorcowych, których chropowatość wg PN-72/M-53101 ^{*}/ nie może przekraczać $Ra_{max} \leq 0,025$ [μm].

Ponadto przy pomiarach z zastosowaniem płytek interferencyjnych zakłada się na ogół, że kąt padania jest bliski zeru, a to wprowadza ograniczenia jeżeli chodzi o zakres pomiarowy, ponieważ w zależności od kąta padania można uzyskać różne zmiany odchyłki kształtu między dwoma są-

^{*}/ PN-72/M-53101 - Warsztatowe środki pomiarowe. Płytki wzorcowe.

siedniami prążkami - wzór /1.06./. Nie uwzględnienie kąta padania powoduje, że pomiar taki obarczony jest błędem, przy czym o ile możliwe jest nie uwzględnianie kąta padania bez popełniania większego błędu przy pomiarach niepłaskości płytek wzorcowych, zakładając normalny kąt padania, to pominięcie wpływu kąta padania przy pomiarze równoległości czy niepłaskości kowadełek lub wrzecion śrub mikrometrycznych [30] prowadzi do dużych błędów. Błąd spowodowany nie uwzględnieniem kąta padania można łatwo obliczyć. Wyznamy go dla przypadku pomiaru równoległości wrzeciona śruby mikrometrycznej /rys. 6./.



Rys. 6. Pomiar równoległości wrzeciona śruby mikrometrycznej przy użyciu płytki interferencyjnej

Rozpatrzmy dwa przypadki:

$$\begin{aligned} 1/ \text{ Zakładając, że } \beta = 0^\circ \text{ czyli } \cos 0^\circ = 1, \quad n = 5 \\ \text{ błąd równoległości} = \Delta r_0 = n \cdot \Delta h_{p-(p-1)} = \\ = n \frac{\lambda}{2} = 1,58 \text{ } [\mu\text{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2/ \text{ Zakładając, że } \beta = 30^\circ, \text{ czyli } \cos 30^\circ = 0,866, \quad n = 5 \\ \text{ błąd równoległości} = \Delta r_{30^\circ} = n \cdot \Delta h_{p-(p-1)} = \\ = n \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot 0,866} = 1,82 \text{ } [\mu\text{m}] \end{aligned}$$

Błąd względny spowodowany nie uwzględnieniem kąta padania wynosi:

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta r_0 - \Delta r_{30^\circ}}{\Delta r_{30^\circ}} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{1,58 - 1,82}{1,82} \right| \cdot 100 \% = 13,2 \%$$

Przykład ten w sposób przejrzysty ilustruje, jak duży błąd można popełnić nie uwzględniając kąta padania wiązki światła. Błąd 13,2 % przy dokładnych pomiarach jest bowiem nie do przyjęcia.

Jak już wspomniano kąt padania ma wpływ na zakres pomiarowy. Przyjmując, że przy kącie padania $\beta = 0^\circ$ odległość między prążkami wynosi 2 [mm], co odpowiada zmianie odchyłki kształtu - $\lambda/2$, to przy kącie padania $\beta = 60^\circ$, zmiana odchyłki kształtu wynosi λ , czyli dwa razy więcej. Wynika stąd, że zwiększając kąt padania z 0° do 60° można zwiększyć zakres pomiarowy dwa razy kosztem obniżenia czułości z $\lambda/2$ [$\mu\text{m}/\text{prążek}$] do λ [$\mu\text{m}/\text{prążek}$]. Ponadto ten stosunkowo mały zakres pomiarowy wynika z faktu, że różnica w długości dróg optycznych nie może przekroczyć drogi spójności dla danego źródła światła. Po przekroczeniu tej granicy interferencja znika /w chwili obecnej nie jest to istotne ograniczenie, gdyż istnieją lasery, które mają praktycznie nieograniczoną spójność/. Ponadto na minimalną o-

dległość między dwoma sąsiednimi prążkami, przy której obraz prążków będzie jeszcze dostatecznie wyraźny przy obserwacji nieuzbrojonym okiem, ma wpływ kontrast prążków interferencyjnych [53]. Wielkość tę należy zatem poddać dokładnej analizie czynnikowej i ustalić czynniki, które mają bezpośredni wpływ na kontrast prążków. W celu polepszenia czytelności obrazu interferencyjnego, jak również rozszerzenia zakresu pomiarowego należy dążyć, aby uzyskać interferogramy o maksymalnym kontraście prążków. Dlatego należy przeprowadzić optymalizację warunków holograficznego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn.

Kontrast prążków interferencyjnych zgodnie z [25,44]^{*/} jest określony zależnością:

$$C = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}} \quad /1.10./$$

Maksymalny kontrast prążków $c = 1$ otrzymamy, jeżeli $J_{\min} = 0$, czyli dla zerowej intensywności prążka ciemnego. Minimalny kontrast $C = 0$ występuje gdy $J_{\max} = J_{\min}$, czyli dla równej intensywności prążka jasnego i ciemnego.

Jak wiadomo światło padające na jakąkolwiek powierzchnię [19], a więc i na powierzchnię części maszyn, zostaje rozłożone na trzy składowe o wartościach zróżnicowanych w zależności od właściwości tych powierzchni /materiałów/ a mianowicie:

- pewna część padającego światła zostaje odbita od powierzchni,
- pewna część padającego światła zostaje pochłonięta przez materiał ograniczony tą powierzchnią tzn. zostaje zamieniona na energię, oraz
- pewna część padającego światła przenika przez materiał.

^{*/}Inna literatura podaje, że jest to widzialność prążków interferencyjnych [16]

W pewnych szczególnych przypadkach wartości poszczególnych składowych mogą być zerowe. Ponieważ nas interesuje składowa odbita, która bierze bezpośredni udział w tworzeniu się obrazu interferencyjnego dlatego w dalszej części zajmiemy się głównie analizą tej składowej.

W zależności od właściwości powierzchni odbijającej, odbicie może zachodzić w trojaki sposób:

- kierunkowy
- rozproszony
- mieszany

Światło padające na powierzchnie części maszyn na ogół ulega odbiciu mieszanemu, tzn. część padającego światła jest odbijana kierunkowo, a część ulega rozproszeniu. Informacje o kształcie badanej powierzchni daje składowa odbita kierunkowo - czyli jest to składowa pożądana. Światło odbite, które ulega rozproszeniu, nie zawiera informacji o kształcie badanej powierzchni, wprowadza natomiast szumy do obrazu prążków interferencyjnych w postaci zmniejszania kontrastu prążków. Jeżeli składowa ta będzie rosła w stosunku do składowej odbitek kierunkowo, to kontrast prążków będzie malał aż do zupełnego zaniku. Widać z tego, że składowa rozproszona jest niepożądana. Można się domyślić, że bezpośredni wpływ na składową rozproszoną ma chropowatość badanych powierzchni. Jeżeli chropowatość rośnie, to udział składowej rozproszonej również rośnie, a składowej odbitej kierunkowo maleje. Dlatego należy doświadczalnie określić w jakim stopniu chropowatość badanych powierzchni wpływa na kontrast prążków interferencyjnych, a więc i na zakres pomiarowy interferometru holograficznego. Poza tym część światła padającego na powierzchnię zostaje pochłonięta, przy czym ilość światła pochłoniętego może się zmieniać w zależności od rodzaju materiału /współczynnik odbicia/, z którego wykonane są badane powierzchnie np. stal, miedź, żeliwo itp. Należy również doświadczalnie sprawdzić czy rodzaj materiału ma isto-

tny wpływ na kontrast prążków przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni, a co za tym idzie na optymalizację warunków holograficznego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn.

1.1.2. Analiza holograficznych metod określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn

Obrazy przedmiotów otrzymywane dotychczasowymi metodami /np. obrazy fotograficzne/ zawierają jedynie przekazywane przez fale świetlne informacje o amplitudach fal /tj. ich natężeniu/. Analiza tego typu obrazów, zawierających informację o zarejestrowanym przedmiocie tylko w postaci amplitud nie daje całkowitej informacji o badanym przedmiocie. Metodą, która daje zapis informacji o badanym obiekcie z zachowaniem wszelkich wzajemnych stosunków amplitudowych i fazowych, jest metoda holografii. Na hologramie, w przeciwieństwie do zwykłego obrazu fotograficznego, na którym zapisany jest obraz będący rzutem przedmiotu na płaszczyznę, zarejestrowany jest układ prążków interferencyjnych zawierających kompleksową informację o fali świetlnej docierającej do hologramu.

Aby kompleksowa informacja mogła być zarejestrowana, fale świetlne użyte do zapisu muszą posiadać zdolność do interferencji, czyli musi to być wiązka światła spójnego. Burzliwy rozwój holografii datuje się od 1960 r., kiedy to wynaleziono źródło światła spójnego - LASER.

ZASADY HOLOGRAFII

Ponieważ zasady holografii zostały dokładnie omówione w wielu publikacjach i wydawnictwach książkowych zarówno krajowych [4, 8, 48, 71], jak i zagranicznych [9, 13, 33, 43, 67, 69, 80], dlatego szczegółowa analiza tego zagadnienia nie wydaje się tutaj celowa. Przedstawiony zostanie jedynie ogólny zarys i pewne matematyczne zależności opisujące tworzenie się holograficznego obrazu.

1. Zapis hologramu

Najlepszymi obecnie z dostępnych materiałów do zapisu holograficznego są płyty fotograficzne, dlatego przy zastosowaniu metody holograficznej do określania topografii błędów kształtu powierzchni, rejestracja będzie się odbywać na tych materiałach. W płycie fotograficznej następuje zamiana amplitudy przestrzennego pola interferencyjnego na przestrzenny rozkład przepuszczalności amplitudowej warstwy światłoczułej. Ten przestrzenny rozkład przepuszczalności amplitudowej w odpowiednim układzie optycznym pozwala odtworzyć zarejestrowaną falę świetlną, która tworzy obraz przedmiotu.

Rozkład amplitud i faz fali przedmiotowej i fali odniesienia możemy opisać zależnościami:

$$\begin{aligned} A_p(x,y) &= a_p(x,y) \exp i \varphi_p(x,y) && - \text{dla fali przedmiotowej} \\ A_o(x,y) &= a_o(x,y) \exp i \varphi_o(x,y) && - \text{dla fali odniesienia} \end{aligned}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} a_{p,o}(x,y) &= |A_{p,o}(x,y)| - \text{charakteryzuje rozkład odpowiednich amplitud fali przedmiotowej i odniesienia,} \\ \varphi_{p,o} &- \text{charakteryzuje rozkład odpowiednich faz fali przedmiotowej i odniesienia} \end{aligned}$$

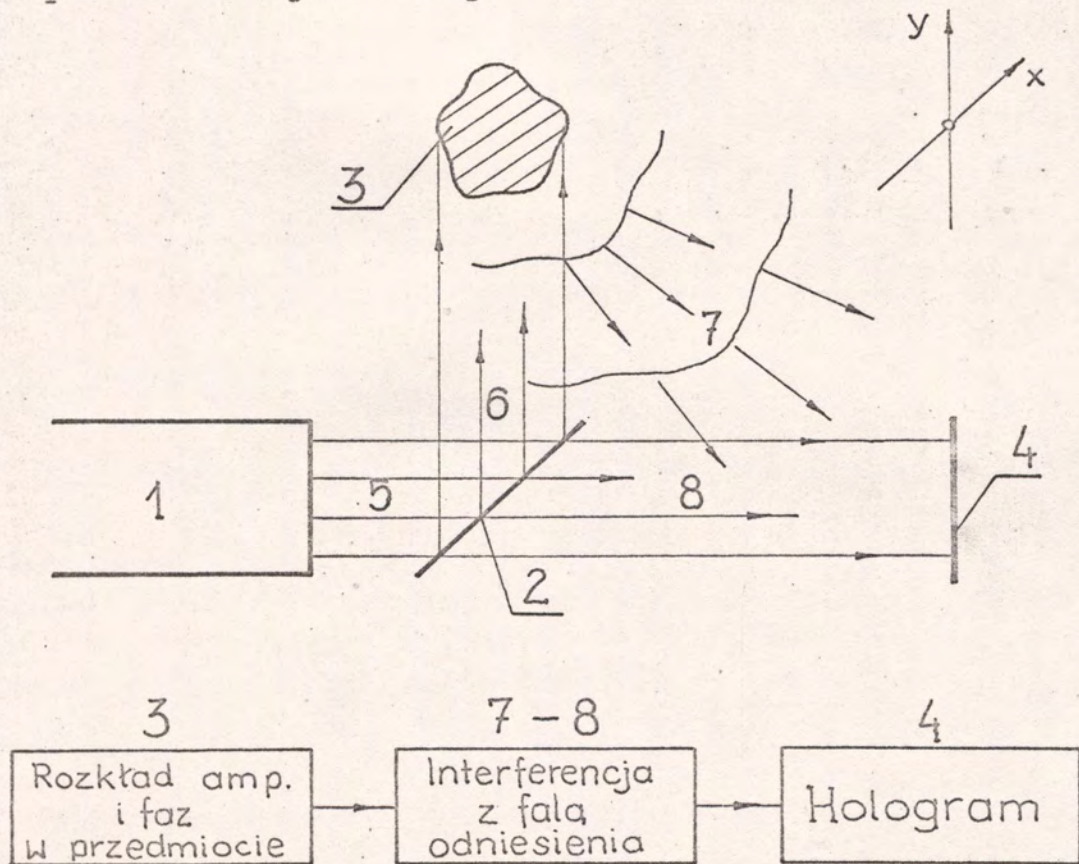
W płaszczyźnie płyty fotograficznej xy /rys. 7/ fale A_p i A_o interferują, dają pole będące sumą poszczególnych fal o natężeniu:

$$\begin{aligned}
 J &= |A|^2 = |A_p + A_o|^2 = |A_p + A_o| |A_p + A_o|^* = \\
 &= |A_p|^2 + |A_o|^2 + A_p A_o^* + A_p^* A_o = \\
 &= a_p^2 + a_o^2 + a_p a_o \exp i(\varphi_p - \varphi_o) + a_p a_o \exp i(\varphi_o - \varphi_p)
 \end{aligned}$$

/1.11./

lub

$$J = a_p^2 + a_o^2 + 2a_p a_o \cos(\varphi_p - \varphi_o)$$



Rys. 7. Schemat zapisu holografu: 1 - laser, 2 - element światkodzielący, 3 - przedmiot, 4 - płyta fotograficzna, 5 - wiązka laserowa, 6 - wiązka oświetlająca przedmiot, 7 - wiązka przedmiotowa, 8 - wiązka odniesienia

Jeżeli założymy, że rozkład natężenia zmienia się w obszarze liniowości charakterystyki światłoczułości płyty fotograficznej, to między amplitudowym współczynnikiem przepuszczenia płyty a rozkładem natężenia zachodzi następująca zależność [33, 67, 80]:

$$\tau = \tau_0^{-\frac{\Gamma}{2}}$$

gdzie:

τ - amplitudowy współczynnik przepuszczania płyty

Γ - współczynnik kontrastowości emulsji [67, 80]

Wartość Γ zależy od rodzaju emulsji, obróbki fotochemicznej i innych czynników, i można ją wyznaczyć z krzywych Hurtera i Driffielta [71]. Dla materiałów negatywowych współczynnik ten przyjmuje wartości dodatnie, natomiast dla materiałów pozytywowych ujemne.

Korzystając ze związku /1.11./ otrzymamy

$$\begin{aligned} \tau &= \left(|A_p|^2 + |A_o|^2 + A_p A_o^* + A_p^* A_o \right)^{-\frac{\Gamma}{2}} \\ &= |A_o|^{-\Gamma} \left(1 + \left| \frac{A_p}{A_o} \right|^2 + \frac{A_p A_o^*}{|A_o|^2} + \frac{A_p^* A_o}{|A_o|^2} \right)^{-\frac{\Gamma}{2}} \end{aligned}$$

Wyrażenie

$$\left(1 + \left| \frac{A_p}{A_o} \right|^2 + \frac{A_p A_o^*}{|A_o|^2} + \frac{A_p^* A_o}{|A_o|^2} \right)^{-\frac{\Gamma}{2}}$$

można rozwinąć w szereg potęgowy Maclaurina wg $\left| \frac{A_p}{A_o} \right|^2$. Ograniczając się do wyrazów liniowych otrzymamy:

$$= |A_o|^{-\Gamma} \left(1 - \frac{\Gamma}{2} \left| \frac{A_p}{A_o} \right|^2 - \frac{\Gamma}{2} \frac{A_p A_o^*}{|A_o|^2} - \frac{\Gamma}{2} \frac{A_p^* A_o}{|A_o|^2} + \dots \right)$$

Fala odniesienia jest zazwyczaj falą płaską lub kulistą, dającą w płaszczyźnie xy jednorodne oświetlenie, które normalujemy do jedności

$$|A_o|^2 = a_o^2 = 1$$

/1.12./

Ponadto warunki eksperymentu dobiera się tak aby:

$$|A_o| \gg |A_p|$$

Oznacza to, że:

$$\left| \frac{A_p}{A_o} \right|^2 \ll 1$$

Warunek ten pozwala na pominięcie członu:

$$\frac{\Gamma}{2} \left| \frac{A_p}{A_o} \right|^2$$

Otrzymujemy zatem:

$$\tau = |A_o|^{-\Gamma} \left(1 - \frac{\Gamma}{2} A_p A_o^* - \frac{\Gamma}{2} A_p^* A_o \right)$$

Wyrażenie to z dokładnością do wyrazu $|A_o|^{-\Gamma}$, który charakteryzuje jednorodną absorpcję na całej powierzchni hologramu, przyjmie postać:

$$\tau = 1 - \frac{\Gamma}{2} A_p A_o^* - \frac{\Gamma}{2} A_p^* A_o$$

/1.13./

lub

$$\tau = 1 - \Gamma a_p a_o \cos(\varphi_p - \varphi_o)$$

Wyrażenie takiej postaci zawiera informacje o amplitudzie i fazie fali przedmiotowej.

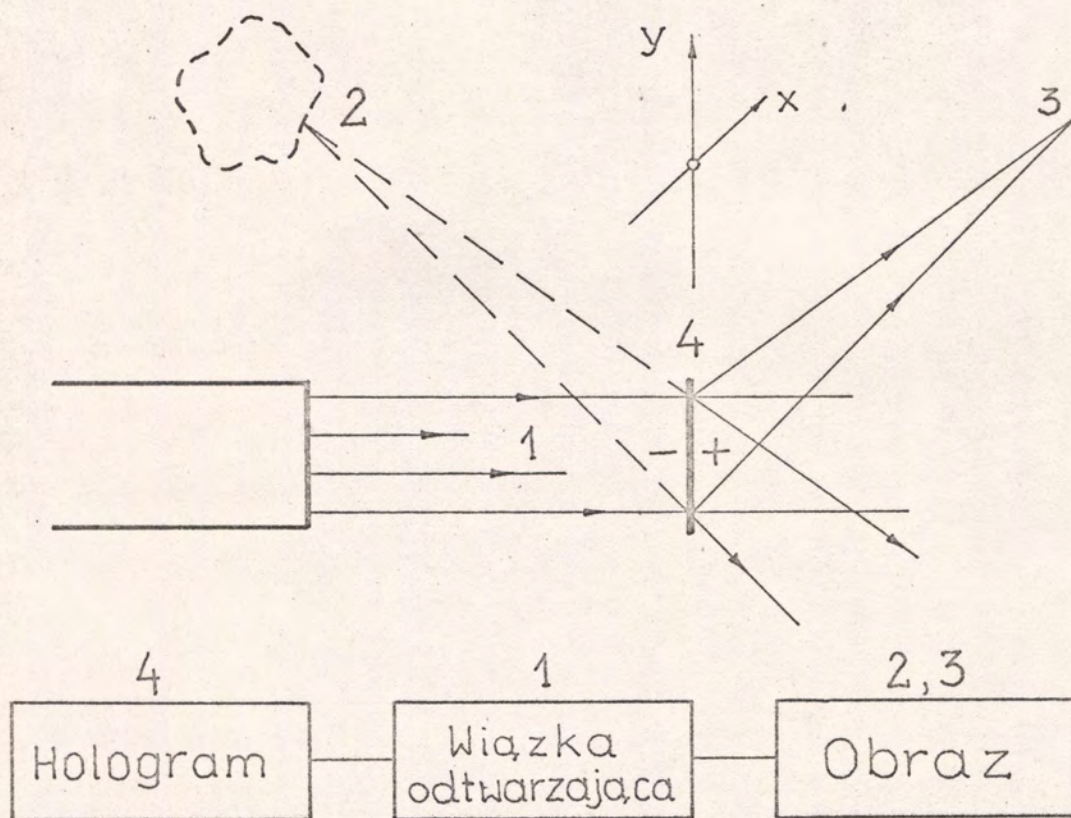
2. Odtwarzanie hologramu

Dla uproszczenia rozważań przyjęto, że odtwarzająca wiązka światła jest identyczna z wiązką odniesienia stosowaną przy zapisie, czyli:

$$A_r = A_o$$

Na powierzchni hologramu, oznaczonej znakiem "+" /rys.8/ rozkład amplitud i faz po przejściu przez hologram wynosi:

$$A_{\tau} = \tau \cdot A_r$$



Rys. 8. Schemat odtwarzania hologramu: 1 - wiązka odtwarzająca, 2 - obraz pozorny, 3 - obraz rzeczywisty, 4 - hologram

Uwzględniając wyrażenie /1.13./ oraz założenie, że $A_r = A_o$ otrzymamy związek

$$A_r = A_o - \frac{\Gamma}{2} A_p - \frac{\Gamma}{2} A_p^* A_o^2 \quad /1.14./$$

określający rozkład amplitud i faz fali po przejściu przez hologram.

Ze względów jakościowych przyjmuje się w praktyce dla hologramów pozytywowych $\Gamma = -2$, natomiast dla hologramów negatywowych $\Gamma = +2$. Uwzględniając to, wyrażenie /1.14./ można ostatecznie zapisać w postaci:

$$A_r = A_o \pm A_p \pm A_p^* A_o^2 \quad /1.15./$$

znak "+" odnosi się do hologramów pozytywowych a znak "-" do hologramów negatywowych.

Człon pierwszy nie zawiera informacji o przedmiocie, nie ma on żadnego związku z obrazem, ale stanowi pewien rodzaj ciągłego tła, które jest zlokalizowane na przedłużeniu geometrycznym wiązki odtwarzającej hologram. Część energii tej wiązki jest rozproszona i jako szkodliwe tło może nałożyć się na zrekonstruowany obraz.

Człon drugi odpowiada odtworzeniu wiązki rozbieżnej, dochodzącej do płyty od przedmiotu dającej przestrzenny, stereoskopowy, urojony obraz przedmiotu. Obraz ten znajduje się w miejscu, w którym znajdował się przedmiot w czasie procesu rejestracji. Odtworzona wiązka wywołuje takie samo wrażenie jak wiązka pierwotna, czyli biegnąca bezpośrednio od przedmiotu.

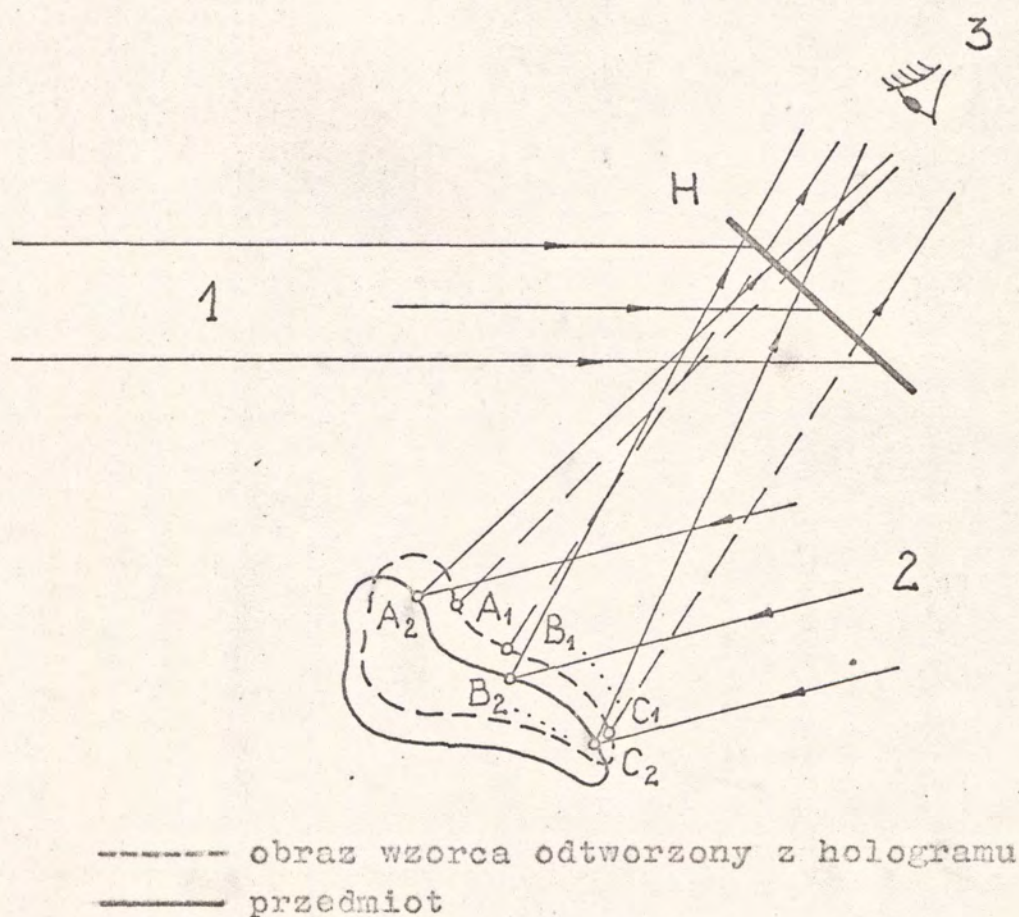
Człon trzeci odpowiada wiązce zbieżnej, dającej rzeczywisty obraz przedmiotu. Obraz ten ma również charakter przestrzenny, ale pseudoskopowy, tzn., że dalsze od płyty części przedmiotu są w obrazie bliżej i odwrotnie.

Interferometria holograficzna

W dwuwiązkowej interferometrii klasycznej badania polegają na porównywaniu fali wzorcowej i przedmiotowej, uformowanych w tym samym czasie, lecz biegnących innymi drogami. Fala przedmiotowa po przejściu lub odbiciu od badanego przedmiotu ulega zaburzeniu, co przejawia się podczas interferencji tych fal w postaci prążków interferencyjnych. Aby otrzymać adekwatną informację o przedmiocie obie fale w nieobecności przedmiotu muszą być jednakowe z dokładnością dużo większą od wymaganej dokładności pomiarów [50]. Wiąże się to z bardzo dokładnym wykonaniem wszystkich elementów optycznych i mechanicznych interferometru co znacznie powiększa koszty wykonania przyrządu,

Przy zastosowaniu metody interferometrii holograficznej proces interferencji przebiega dwustopniowo. Zasada dwustopniowego procesu interferencji holograficznej stwarza nowe możliwości zastosowania jej w wielu dziedzinach, stymulując opracowanie nowych bardzo dokładnych i obiektywnych technik pomiarowych. Dzięki temu, że holografia umożliwia zapisywanie informacji o stosunkach fazowych w polu optycznym istnieje możliwość rozdzielenia czasu wytwarzania porównywanych fal, z których jedna lub obie mogą być najpierw zapisane na hologramie a dopiero później porównywane metodami interferencyjnymi [22]. Metody te są praktycznie stosowane do dokładnego porównywania dwóch przedmiotów: wzorca i przedmiotu badanego. Hologram, wykonywany zazwyczaj dla wzorca otrzymany po przeprowadzeniu obróbki fotochemicznej płyty fotograficznej, należy wstawić dokładnie w to samo miejsce, w którym znajdowała się płyta fotograficzna w czasie procesu rejestracji. Poza tym w celu przeprowadzenia procesu porównywania wzorzec należy zastąpić przedmiotem badanym, nie zmieniając geometrii układu. Hologram z zarejestrowanym obrazem wzorca jest oświetlony równocześnie wiązką odniesie-

nia i wiązką przedmiotową, w wyniku czego w kierunku obserwacji będzie widoczny obraz holograficzny wzorca oraz przedmiot badany /rys. 9/. W wyniku interferencji wiązki światła odtwarzającej obraz holograficzny wzorca z wiązką światła uformowaną na przedmiocie badanym, otrzymuje się interferogram, z którego można określić ilościowe różnice pomiędzy trójwymiarowym badanym przedmiotem a jego wzorcem, a więc wykryć niedokładności w jego wykonaniu. Metoda ta jest już obecnie powszechnie stosowana do badania elementów optycznych w czasie ich obróbki [31, 32].



Rys. 9. Zasada tworzenia interferogramu na skutek porównania przedmiotu z obrazem holograficznym wzorca
1 - wiązka odtwarzająca, 2 - wiązka oświetlająca badany przedmiot, 3 - obserwator

Interferogram otrzymany opisaną wyżej metodą jest w istocie topografią błędów kształtu powierzchni badanego przedmiotu w stosunku do powierzchni wzorcowej. Prążki interferencyjne charakteryzujące ilościowo błędy kształtu badanej powierzchni, są miejscami geometrycznymi punktów powierzchni posiadających stałą odległość w stosunku do powierzchni wzorcowej.

Inna grupa badaczy [12, 15, 16, 21, 24, 64, 65, 78, 79] rozwinęła holograficzną metodę interferometryczną, znaną pod nazwą holograficznej metody konturowania obiektów lub holograficznej topografii obiektów, która również pozwala na wykrywanie różnic pomiędzy dwoma powierzchniami. W metodzie tej prążki interferencyjne przedstawiają miejsce geometryczne punktów powierzchni rozpatrywanego przedmiotu, posiadających stałą odległość w stosunku do przyjętej płaszczyzny odniesienia. Realizacja tej metody może przebiegać trzema sposobami:

- przedmiot zostaje oświetlony dwoma wiązkami światła o różnej długości fali [21],
- przedmiot zostaje oświetlony dwoma wiązkami światła o tej samej długości fali przy czym wiązka przedmiotowa zostaje przesunięta względem siebie [15] w czasie drugiej ekspozycji,
- przedmiot zostaje oświetlony wiązką światła o stałej długości fali, przy czym zmienia się współczynnik ośrodka, którym wypełniona jest przestrzeń pomiędzy powierzchnią obiektu [12, 65, 79]; sposób ten nosi nazwę metody imersyjnej.

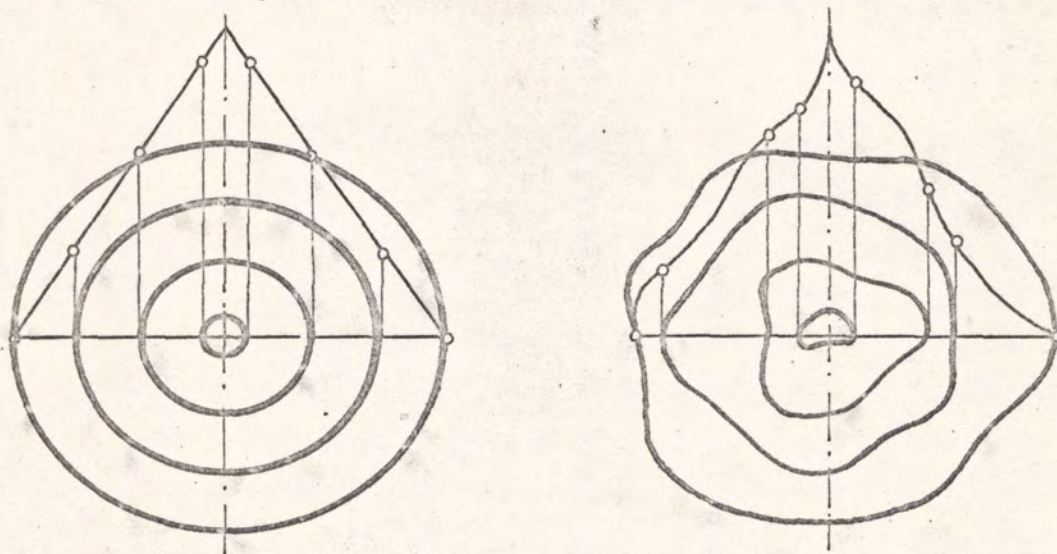
Sposoby te mogą być realizowane dwoma metodami interferometrii holograficznej:

- metodą czasu rzeczywistego
- metodą dwukrotnej ekspozycji.

Holograficzną metodę konturowania obiektów można by było

również zastosować do określania błędów kształtu powierzchni części maszyn, wówczas należy wykonać metodą dwukrotnej ekspozycji topografię powierzchni wzorcowej^{*/}. Po odtworzeniu takiego hologramu uzyskany interferogram stanowić może obraz wzorcowych prążków interferencyjnych. Jakkolwiek odstępstwa w kształtowaniu prążków interferencyjnych dla powierzchni badanej spowodowane będą błędami kształtu tej powierzchni w stosunku do powierzchni wzorcowej /rys. 10/. Szczegółowa analiza interferogramu powierzchni badanej umożliwia ilościowe określenie odstępstw tej powierzchni w stosunku do powierzchni wzorcowej.

Informacje o powierzchni wzorcowej można "zamrozić" w postaci hologramu testującego. W ten sposób istnieje możliwość utworzenia tzw. banku informacji w postaci hologramów testujących, wykonanych dla dowolnych trójwymiarowych powierzchni wzorcowych.



Rys. 10. Topografia: a- wzorcowej powierzchni stożkowej
b- badanej powierzchni stożkowej

^{*/} Wykonanie hologramu powierzchni wzorcowej nie jest konieczne ponieważ z zależności geometrycznych możemy wyznaczyć prążki wzorcowe. Jest to jeszcze jedna zaleta tej metody, gdyż powierzchnie wzorcowe o skomplikowanych kształtach są trudne do wykonania i sprawdzenia.

Do tej pory metody tej nie stosowano do określania błędów kształtu powierzchni części maszyn. Metoda ta może stanowić uzupełnienie holograficznej metody określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn zarówno pod względem rozszerzenia zakresu pomiarowego interferometru jak również może umożliwić pomiar błędów kształtu powierzchni o złożonych kształtach, jak np. łopatek turbin itp. powierzchni. W dalszej części pracy metoda ta nie będzie rozpatrywana.

Interferometria holograficzna może być realizowana kilkoma metodami:

1. Metodą uśredniania w czasie.

Metoda ta powszechnie stosowana w analizie drgań polega na tym, że hologram drgającego przedmiotu wykonuje się w czasie dużo dłuższym niż okres drgań. Jeżeli na badanym przedmiocie wytworzy się fala mechaniczna stojąca, wówczas w procesie rekonstrukcji nieruchome fragmenty przedmiotu /miejsca węzłowe/ przejawiają się w postaci jasnych plam, natomiast miejsca drgające są pokryte prążkami interferencyjnymi [52, 56, 68].

2. Metoda podwójnej ekspozycji

Metoda ta polega na tym, że na jednym hologramie są zarejestrowane dwa stany tego samego przedmiotu [17, 20]. Stosując tę metodę, np. w analizie naprężeń, wykonujemy najpierw hologram przedmiotu nieodkształconego, następnie zaś po odkształceniu przedmiotu /np. obciążeniu belki, dokręceniu głowicy do cylindra, pokrywy do korpusu itp./ wykonujemy drugą ekspozycję. W czasie odtwarzania hologramu na skutek interferencji wiązek światła pochodzących od przedmiotu nieodkształconego oraz od tego samego przedmiotu po odkształceniu pojawiają się prążki inter-

ferencyjne charakteryzujące zaistniałe zmiany geometryczne.

3. Metoda obserwacji "na żywo" nazwana również metodą "w czasie rzeczywistym".

Metoda ta polega na tym, że rejestrują się obraz przedmiotu w jednym stanie, następnie, zaś, niczego nie zmieniając w układzie, przeprowadza się obróbkę fotochemiczną płyty fotograficznej, którą jako hologram wstawia się dokładnie w to samo miejsce, które zajmowała płyta fotograficzna w czasie procesu rejestracji /obróbka fotochemiczna płyty fotograficznej może być przeprowadzona w miejscu/. Wiązka światła odtworzona z hologramu interferuje z wiązką odbitą od przedmiotu, który znajduje się już w innym stanie niż w procesie rejestracji.

Analiza interferogramu w metodzie obserwacji "na żywo" /jak również w metodzie podwójnej ekspozycji/ pozwala na uzyskanie informacji o zmianie np.: ciśnienia, temperatury, deformacji itd. Było to punktem wyjścia do prowadzenia badań nad możliwością holograficznego porównywania kształtu przedmiotu, który został wcześniej zarejestrowany na płycie fotograficznej, z jego kształtem w czasie późniejszym. Umożliwiło to przeprowadzenie analizy mechanicznych, cieplnych odkształceń oraz pęczania. Dla małych odkształceń następuje interferencja fali odtworzonej z hologramu z falą biegnącą bezpośrednio od przedmiotu. Z interferogramu można przeprowadzić dokładną analizę odkształceń badanego przedmiotu jak również obserwować na bieżąco przebieg zmian w badanym przedmiocie.

Następnie zaczęto rozważać możliwość zastosowania interferometrii holograficznej do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, co w konsekwencji umo-

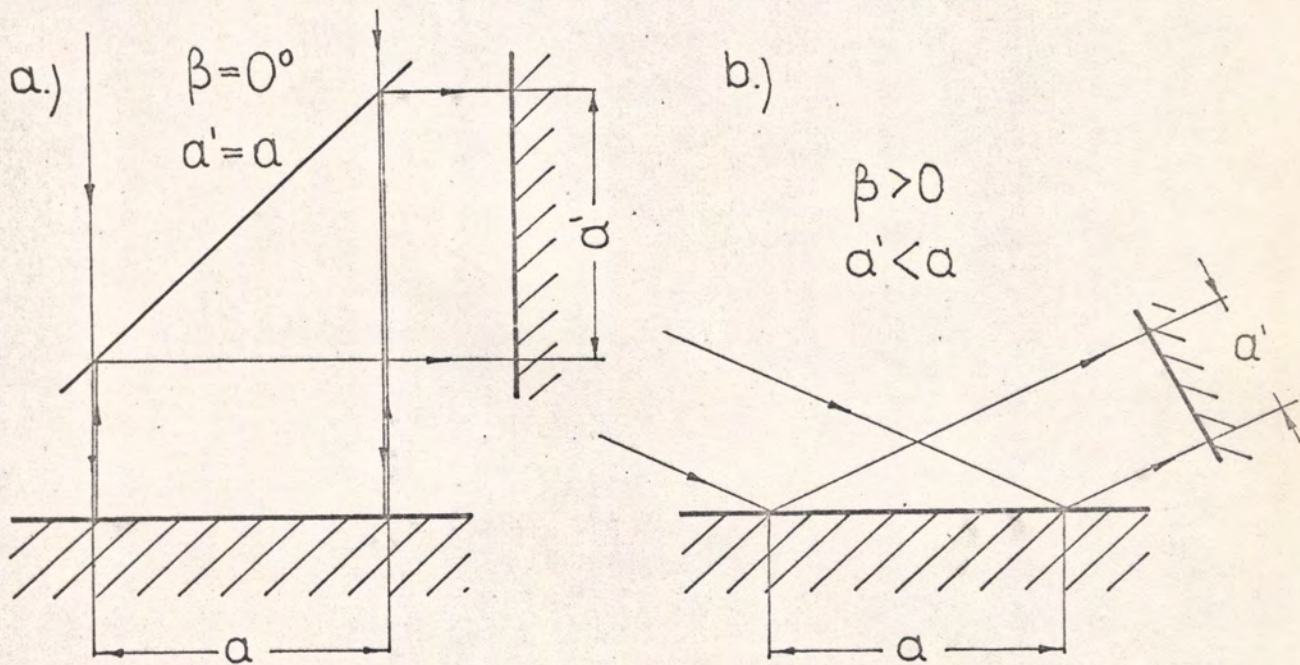
żliwiłoby rozszerzenie zakresu zastosowania interferometrii klasycznej w metrologii warsztatowej, tzn. pomiarów na gładkich i regularnych powierzchniach do bardziej ogólnego przypadku powierzchni trójwymiarowych. Autorzy pracy [1] wykazali na przykładzie określania niedokładności kształtu wewnętrznych powierzchni cylindrycznych silników spalinowych, że pomiary takie są możliwe w pewnych określonych warunkach. Powierzchnię jednego cylindra przyjęto jako wzorzec i porównywaną ją z powierzchniami takich samych innych cylindrów. W rezultacie otrzymano topograficzne mapy błędów kształtu badanych powierzchni cylindrycznych. Prowadzone były również prace nad określaniem błędów kształtu wewnętrznych powierzchni wtryskiwaczy silników wysokoprężnych [2]. Wykazano, że pomiary takie są możliwe w pewnych określonych warunkach, które zostaną omówione w p. 1.1.3. i że interferometria holograficzna umożliwia sporządzanie topografii błędów kształtu badanych powierzchni w stosunku do interferometrii klasycznej w sposób prostszy i szybszy /metodą interferometrii klasycznej można porównywać tylko małe odcinki cylindra i wymaga ona stosowania dzielnika wiązki o szerokiej aperturze oraz elementów kompensacyjnych takich jak: stożki odbijające, które są trudne do wykonania i sprawdzenia [1]/. Ponadto metodę holograficzną możnaby stosować do określania błędów kształtu elementów tocznych w łożyskach, do określania błędów kształtu tulei, panewek, itp., jak również realnego przedmiotu od jego idealnego kształtu [18]. Wreszcie w przypadku elementów optycznych wykonywane są hologramy syntetyczne z zapisem obrazu wzorcowego /fali wzorcowej/, przy użyciu maszyn matematycznych [9]. Metoda ta znalazła już obecnie zastosowanie przy kontroli asferycznych elementów optycznych, dla których nie było materialnego wzorca [7, 35, 84, 85].

1.1.3. Warunki holograficznego porównywania powierzchni części maszyn

Praktycznie nie ma możliwości wykonania dwóch identycznych powierzchni części maszyn zarówno pod względem chropowatości jak również jej kształtu. W związku z tym nigdy nie uzyskamy zupełnej zgodności pomiędzy dwoma porównywanymi powierzchniami, tzn. powierzchnią badaną oraz obrazem powierzchni wzorcowej odtworzonej z hologramu. Autorzy pracy [1] twierdzą, że jeżeli chropowatość badanych powierzchni będzie większa od $1/4 \lambda$, wówczas wystąpią szумы w interferencji, charakterystycznej dla klasycznej interferencji dwupromieniowej. Szумы te spowodowane są rozproszeniem promieniowania na mikronierównościach kontrolowanych powierzchni części maszyn. Nie oznacza to jednak wcale, że interferencja w ogóle nie nastąpi. Spowoduje to jednak spadek kontrastu prążków interferencyjnych aż do zupełnego ich zaniku przy dużych chropowatościach. Można oczywiście temu zapobiec przez zastosowanie odpowiedniej obróbki, nie jest to jednak właściwe rozwiązanie zagadnienia, ponieważ metody kontroli powinny być dobrane do wymagań, jakie stawia konstruktor zarówno co do dokładności wymiarowo-kształtowej jak również chropowatości powierzchni, a nie odwrotnie. Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest stosowanie dużego kąta padania wiązki przedmiotowej. Wówczas powierzchnie o dużej chropowatości dają odbicie podobne do odbicia w lustrze [1]. Zastosowanie dużego kąta padania wiązki przedmiotowej powoduje skrócenie obrazu badanej powierzchni /rys. 11/, z ilościowego zaś punktu widzenia powoduje to obniżenie czułości metody [1], a zatem zmniejszenie dokładności pomiarów, co zostało rozpatrzone w p. 1.1.1., z podanej zależności /1.06./ wynika, że czułość metody interferometrycznej jest wprost proporcjonalna do cosinusa kąta padania wiązki przedmiotowej.

Jak zmienia się czułość metody interferometrycznej w całym przedziale kątów padania, tj. od $0 + 90^\circ$ dla światła lasera

He-Ne pokazano w tablicy 1 i na rys. 12. Czujność tę można nieznacznie zmieniać stosując inne źródło promieniowania, np. laser argonowy.



Rys. 11. Wpływ kąta padania wiązki światła na skrócenie obrazu powierzchni

- a/ $\beta = 0^\circ$ - nie następuje skrócenie ($a' = a$)
- b/ $\beta \neq 0^\circ$ - następuje skrócenie ($a' < a$)

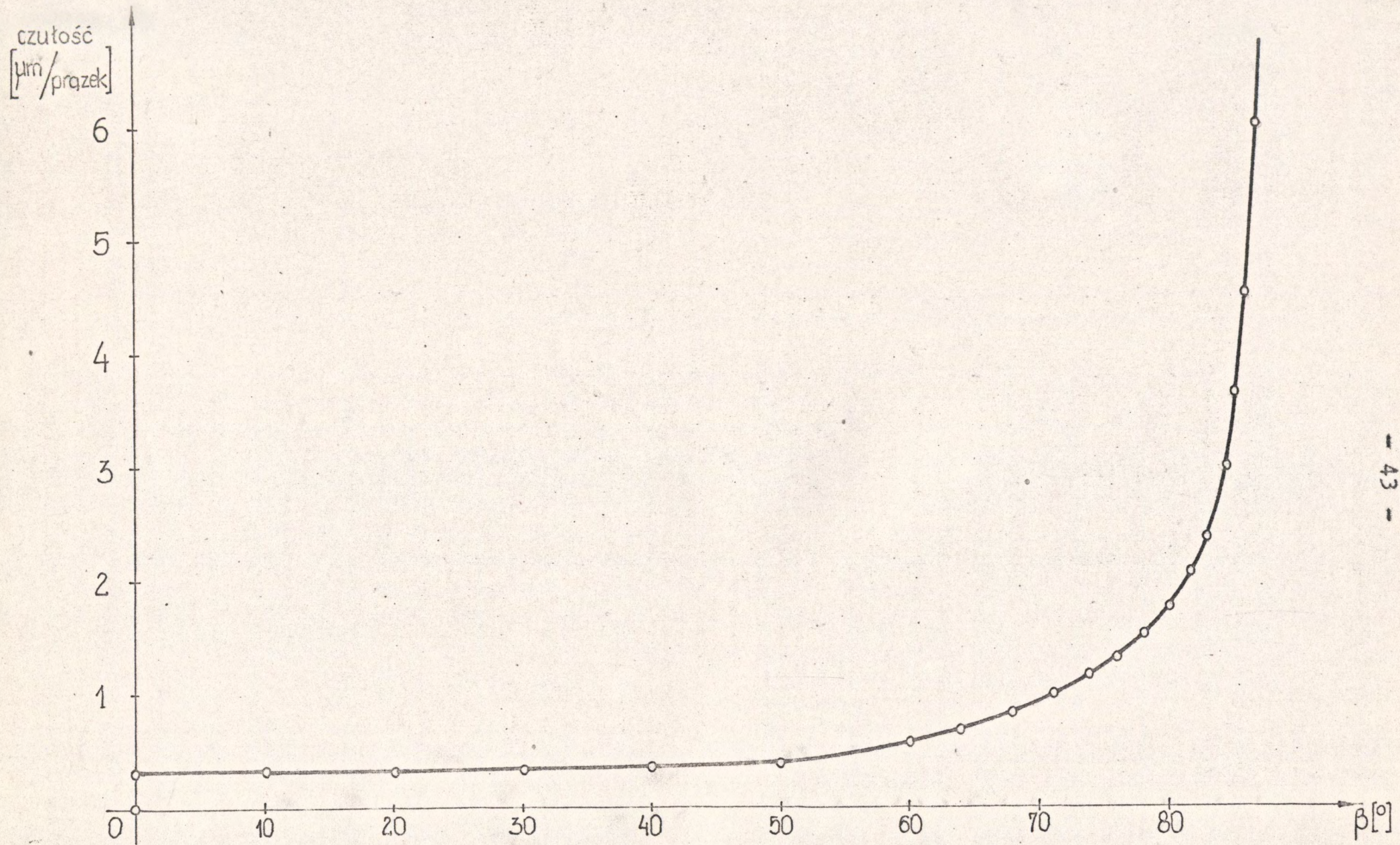
TABLICA 1. Zmiana czułości metody interferometrycznej w zależności od kąta padania dla światła lasera He - Ne

Kąt padania [°]	0	10	15	20	25	30	35
czułość [μm/prążek]	0,316	0,321	0,328	0,338	0,349	0,365	0,386

40	45	50	55	60	62	64	66	68
0,413	0,447	0,452	0,492	0,633	0,674	0,722	0,788	0,845

70	71,5	74	76	78	80	81	82	83
0,925	0,997	1,148	1,308	1,522	1,823	2,023	2,273	2,596

84	85	85	87	88	89	90		
3,028	3,628	4,533	6,048	9,066	18,08			



- 43 -

Rys. 12. Zmiana czułości w zależności od kąta padania dla światła lasera He-Ne - $\lambda = 0,6328$ [μm]

W technologii maszyn klasy dokładności kształtu są powiązane z dopuszczalnymi chropowatościami powierzchni [29, 55]. Średnia wysokość nierówności Rz powinna być wg [29] $1,5 \div 2$ razy mniejsza od odchyłki od płaskości. Duże kąty padania powinno się zatem stosować do określania błędów kształtu powierzchni o dużej chropowatości, a tym samym dla niskich klas dokładności kształtu, tak aby to nie odbiło się istotnie na dokładności pomiarów. Przy niezbyt dużej gęstości prążków interferencyjnych oraz jednocześnie przy ich dużym kontraście można zwiększyć dokładność odczytania np. do $1/10$ prążka, dzięki czemu zyskuje się dziesięciokrotnie na dokładności pomiarów. Należy jednak pamiętać, że dokładność odczytania nie powinna przekroczyć dokładności interferometru, gdyż wówczas taki pomiar będzie nieadekwatny, np.:

dokładność odczytania 0,1 prążka przy czułości 0,6 μm /prążek daje 0,06 [μm]; wynika z tego, że przy 10 prążkach interferencyjnych mamy

$$6 \pm 0,06 [\mu\text{m}]$$

podczas gdy dokładność interferometru wynosi $\pm 0,3 \mu\text{m}$, czyli

$$6 \pm 0,3 [\mu\text{m}]$$

Jak widać wartość odczytana na interferometrze wynosi:

$$6 \pm 0,06 [\mu\text{m}]$$

podczas gdy wartość poprawna wielkości wynosi:

$$6 \pm 0,3 [\mu\text{m}]$$

Proces holograficznego porównywania dwóch powierzchni części maszyn jest uwarunkowany wysokimi wymaganiami odnośnie geometrii zestawionego układu. Ponadto aby pomiar był dokładny zestawione stanowisko powinno odznaczać się dużą dokładnością, tzn. zdolnością do wskazywania wartości wielkości bliskich rzeczywistej wartości wielkości mierzonej, a to dodatkowo zwiększa wymagania zwłaszcza odnośnie części mechanicznej zestawionego układu.

Przed przystąpieniem do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn należy zatem najpierw rozwiązać problem dokładnego bazowania i mocowania, czyli ustalania kontrolowanych powierzchni części maszyn. Równolegle z problemem dokładnego i powtarzalnego ustalania kontrolowanych powierzchni części maszyn należy rozwiązać problem dokładnego i powtarzalnego ustalania hologramów otrzymanych po przeprowadzonej obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej. Hologram ten ponownie wstawia się w miejsce, w którym znajdowała się płyta fotograficzna w czasie procesu rejestracji. Wówczas pomiary tą metodą będą adekwatne. Nie rozwiązanie tych problemów spowoduje, że interferogram będzie zawierał szumy w postaci dodatkowych prążków lub ich zniekształceń czyli pomiar taki będzie nieadekwatny, lub w ogóle interferencja może nie nastąpić.

Problem dokładnego i powtarzalnego ustalania kontrolowanych powierzchni części maszyn można rozwiązać albo przez konstrukcję specjalnego przyrządu do ustalania albo innymi sposobami.

Problem dokładnego ustalania hologramów można rozwiązać dwoma sposobami:

1. Stosując metodę podwójnej ekspozycji, czyli po wykonaniu ekspozycji dla powierzchni wzorcowej zamieniamy ją na powierzchnię badaną i nie zmieniając położenia płyty fotograficznej wykonujemy drugą ekspozycję dla powierzchni badanej. Po przeprowadzeniu obróbki fotochemicznej płyty fotograficznej i odtworzeniu hologramu otrzymujemy interferogram, tj. obraz "zamrożonych" prążków interferencyjnych, które określają błędy kształtu badanej powierzchni. Zaletą tej metody jest to, że hologram nie musi znajdować się dokładnie w tym samym miejscu, w którym znajdowała się płyta fotograficzna w czasie procesu rejestracji. Ponadto wymagania na stabilność termi-

czną są niższe niż w metodzie obserwacji "na żywo", a kurczenie się emulsji nie ma wpływu na lokalizację prążków.

2. Stosując metodę obserwacji "na żywo" czyli po wykonaniu ekspozycji dla powierzchni wzorcowej należy przeprowadzić obróbkę fotochemiczną płyty fotograficznej. Można to realizować w dwojaki sposób, mianowicie:

- obróbkę fotochemiczną można przeprowadzać bezpośrednio na stanowisku badawczym, w miejscu gdzie jest zamocowana płyta fotograficzna nie zmieniając jej położenia, lub:
- przeprowadzić obróbkę poza stanowiskiem, przy czym należy wówczas wykonać specjalny przyrząd, który zapewni będzie dokładne, powtarzalne ustalenie hologramu dokładnie w tym miejscu, w którym znajdowała się płyta fotograficzna w czasie procesu rejestracji.

Przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn porównuje się powierzchnię odniesienia, którą jest powierzchnia wzorcowa, z powierzchnią badaną. Metoda obserwacji "na żywo" ma w tym przypadku wiele zalet w porównaniu z metodą podwójnej ekspozycji, gdyż:

- a/ metoda podwójnej ekspozycji nie pozwala na uzyskanie najlepszego dopasowania obu powierzchni - chodzi o spełnienie warunku minimum odchyłki [29],
- b/ metoda podwójnej ekspozycji nie pozwala na jednoznaczny ilościowy ocenę interferogramów ponieważ nie daje możliwości odróżnienia wgłębień od wzniesień,
- c/ w metodzie podwójnej ekspozycji następuje szybkie zużywanie się powierzchni wzorcowej, ponieważ jest ona używana do każdej badanej powierzchni,

- d/ występują trudności w doborze optymalnych parametrów procesu, aby uzyskać optymalny kontrast prążków interferencyjnych dla różnych chropowatości badanych powierzchni,
- e/ występuje duże zużycie płyt fotograficznych, dla każdej badanej powierzchni należy wykonać hologram,
- f/ występuje większa czasochłonność procesu, ponieważ dla każdej badanej powierzchni należy przeprowadzić obróbkę fotochemiczną płyty fotograficznej.

Wymienione wady metody podwójnej ekspozycji wystarczająco uzasadniają przyjęcie do prowadzenia badań określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn metody obserwacji "na żywo", w której po wykonaniu ekspozycji dla powierzchni wzorcowej, obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej, uzyskany hologram wstawiamy w miejsce, które zajmowała płyta w czasie procesu rejestracji. Równocześnie w miejsce powierzchni wzorcowej wstawiamy powierzchnię badaną. Fala wzorcowa zrekonstruowana z hologramu interferuje z falą odbitą od powierzchni badanej a efekt interferencji informuje nas o zmianach w kształcie pomiędzy powierzchnią wzorcową i powierzchnią badaną.

Łatwo można zauważyć, że w metodzie tej wzorzec materialny, którym była w czasie wykonania hologramu powierzchnia wzorcowa, jest zastąpiony w następnym etapie procesu holograficznego, tj. po obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej, wzorcem niematerialnym, którym jest fala wzorcowa /obraz holograficzny powierzchni wzorcowej/ zrekonstruowana z hologramu. Podczas procesu rekonstrukcji hologramu następuje dekodowanie informacji o powierzchni wzorcowej. Otrzymane prążki charakteryzują zmiany długości dróg optycznych między źródłem a każdym punktem przedmiotu, wyrażone w długościach fal. Otrzymuje się więc przestrzenny opis przedmiotu, którym jest topograficzna mapa błędów kształtu.

powierzchni badanej.

Przy zastosowaniu metody obserwacji "na żywo" wymagane jest spełnienie dwóch dość kłopotliwych warunków; aby fala odniesienia nie uległa zmianie i ponadto aby hologram podczas odtwarzania jak również badana powierzchnia po wymianie zajmowały dokładnie takie położenie jak podczas rejestracji [80].

Pierwszy warunek jest łatwy do zrealizowania, jeżeli elementem biorącym udział w tworzeniu i wykorzystaniu wiązki odniesienia zapewni się dużą stabilność mechaniczną oraz temperaturową. Przemieszczanie się wiązek światła powoduje zmianę drogi optycznej, z tym, zaś wiąże się odpowiednia zmiana fazy w płaszczyźnie hologramu. Jedną z istotnych przyczyn powodujących względne przemieszczanie wiązek światła, jest zakłócenie stabilności termicznej przez osobę prowadzącą bezpośrednio badania. Osoba prowadząca badania jest również przyczyną wirowań powietrza. Powoduje to przypadkowe miejscowe zmiany współczynnika załamania ośrodka, co z kolei wprowadza szkodliwe zmiany fazy, przy dużych drganiach optycznych w powietrzu.

Innymi przyczynami powodującymi względne przemieszczanie wiązek są zjawiska mechaniczne. Podzespoły zestawionego stanowiska badawczego po ich ustawieniu na płycie mogą się względem siebie przemieszczać. Ponadto drgania /praca maszyn, ruch uliczny itp./ są przenoszone przez ziemię i stół na stanowisko badawcze. Aby temu zapobiec należy:

- płytę, na której znajduje się zestawiony układ, odizolować od podłoża,
- płyta powinna mieć dużą bezwładność i sztywność w celu zminimalizowania przenoszonych drgań,
- wszystkie elementy zestawionego układu powinny być umieszczone na tej samej płycie.

Spełnienie drugiego podstawowego warunku przy zasto-

waniu metody obserwacji "na żywo" jest bardziej kłopotliwe. Po przeprowadzonej obróbce fotochemicznej płyty, którą zwykle wyjmuje się z przyrządu, ponowne naprowadzenie jej dokładnie w to samo miejsce jest zadaniem trudnym i wymaga dość drogiego i skomplikowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Podobnie przedstawia się problem dokładnego bazowania i mocowania badanych powierzchni. Powierzchnia wzorcowa, odtworzona z hologramu, powinna być tak usytuowana względem powierzchni badanej, aby największa odległość pomiędzy nią a płaszczyzną rzeczywistą /badaną/ była najmniejsza spośród wszystkich możliwych odpowiadających różnym położeniom, wówczas powierzchnia wzorcowa odtworzona z hologramu w postaci fali wzorcowej pokrywać się będzie z powierzchnią przylegającą. Jeżeli warunek ten będzie spełniony wówczas określanie wartości odchyłek kształtu powierzchni części maszyn będzie zgodne z PN-68/M-02137 ^{*/}.

W holograficznej metodzie interferometrycznej, podobnie jak w interferometrii klasycznej /p.1.1.1./, kontrast pola interferencyjnego ma istotne znaczenie z punktu widzenia optymalizacji warunków holograficznego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, jak również ma istotny wpływ na zakres pomiarowy interferometru. Oprócz czynników omówionych w p. 1.1.1. należy zastanowić się jeszcze nad innymi czynnikami, które mogą mieć wpływ na kontrast prążków. W niniejszym punkcie wykazano, że w celu pozbycia się niepożądanego rozproszenia na mikronierównościach powierzchni, które wprowadzają szumy do interferogramu należy uzyskać przewagę odbicia kierunkowego nad odbiciem rozproszonym. Przewagę tę można uzyskać przez stosowanie wiązki światła o dużym kącie padania na powierzchnię badaną. Widać zatem, że kąt padania może mieć wpływ na kontrast prążków. Na kontrast prążków interferencyjnych mogą również wpływać czynniki typu technologicznego, od których zależy jakość odtworzonego z hologramu obrazu. Ilościowym wskaźnikiem jakości odtworzonego obrazu holograficznego może być jego wydajność dyfrakcyjna [9]

^{*/} PN-68/M-02137 - Odchyłki kształtu i położenia. Nazwy i określenia.

Znane firmy; AGFA - GEVAERT, KODAK, zajmujące się produkcją materiałów fotograficznych do celów holograficznych, szczegółowo podają jak zmienia się wydajność dyfrakcyjna hologramu w zależności od różnych parametrów, między innymi: od kąta pomiędzy interferującymi wiązkami światła /przedmiotową i odniesienia/, od ekspozycji oraz jak duże szumy tym zmianom towarzyszą. Ponadto zalecają takie parametry, przy których można uzyskać hologram o optymalnej wydajności dyfrakcyjnej.

1.1.4. Krytyczna ocena dotychczasowych prac z zakresu podjętego tematu

Powyżej zaznaczono, że interferometryczną metodę określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn można zaliczyć do najdokładniejszych metod pomiaru, i że metoda ta powszechnie stosowana w optyce do badań elementów optycznych na różnych etapach obróbki, nie znalazła jak dotąd szerszego zastosowania w metrologii warsztatowej z wyjątkiem pomiaru niepłaskości bardzo dokładnych powierzchni, takich jak: płytki wzorcowe, płaskie końcówki przyrządów pomiarowych itp. powierzchnie. Również rozwój holograficznej interferometrii w ostatnich latach nie wprowadził w tym kierunku istotnych zmian. Niewiele było prowadzonych prac poświęconych możliwości zastosowania holografii do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn w metrologii warsztatowej. Ponadto w pracach tych nie przeprowadzono szczegółowej analizy całego procesu w celu ustalenia ilościowych zależności w postaci matematycznych modeli, które pozwoliłyby na określenie optymalnych warunków procesu oraz w celu wskazania kierunków dalszych prac w tym zakresie, zarówno w kierunku rozwijania tej metody na różne kształty badanych powierzchni i użycia zagadnienia, tzn. wykonania przyrządów pomiarowych na podstawie przeprowadzonych badań. Przypuszczalnie prace, które były prowadzone do tej

pory w tym zakresie, nie znalazły praktycznego zastosowania. Materiały źródłowe zebrane na ten temat niewiele zatem wnoszą do rozwiązania postawionego w niniejszej pracy zagadnienia. Prace w tym kierunku należy praktycznie prowadzić od podstaw.

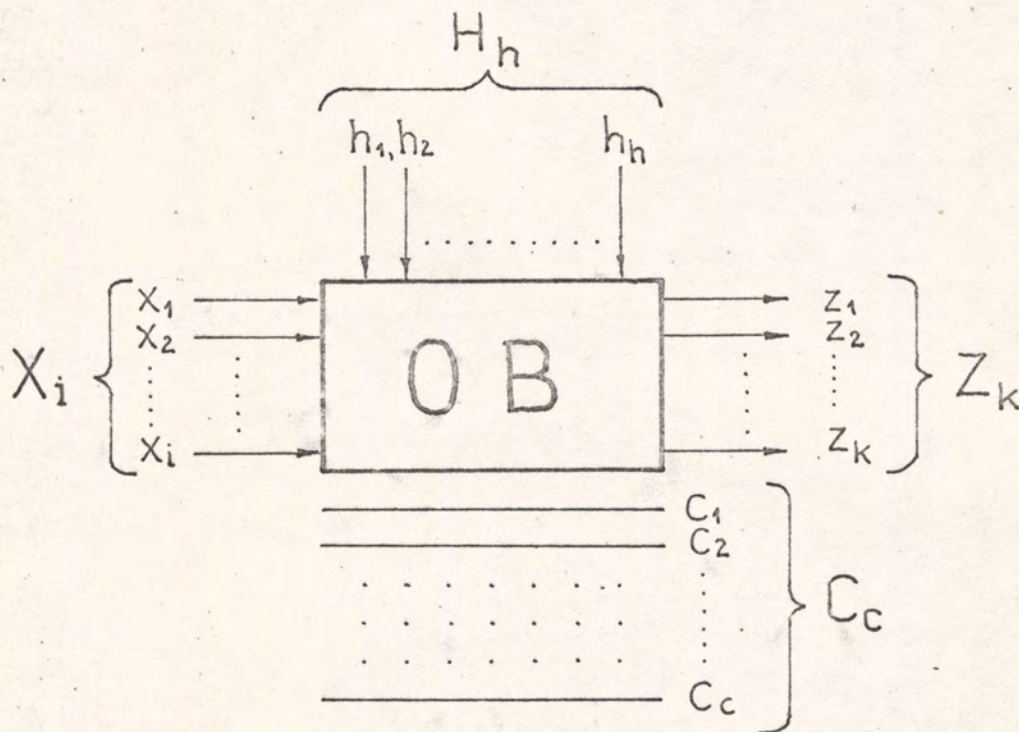
Dużą pomocą natomiast okazała się dokładna analiza interferometrii holograficznej zastosowanej w innych dziedzinach, szczególnie w analizie naprężeń, która dała podstawy zarówno teoretyczne jak również doświadczalne do postawionego zagadnienia. Ponadto należy uznać za pozytywny fakt, że badania prowadzone przez autorów prac [1, 2] dawały pozytywne wyniki nawet przy niezbyt wysokim stopniu stabilizacji mechanicznej zestawionego stanowiska przy jednoczesnym zachowaniu stabilności temperatury $\pm 1 [^{\circ}]$ - przy prowadzeniu badań "w czasie rzeczywistym". Wydaje się, że ma to istotne znaczenie przy użyciu tego zagadnienia.

1.2. Analiza czynnikowa holograficznego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn

Metodyka badań doświadczalnych wg Z. Polańskiego [54] stanowi zespół czynności, mających na celu efektywną realizację postawionego celu pracy doświadczalnej. W zakres tych czynności wchodzi opracowanie programu badań, których celem jest sprawdzenie przyjętych hipotez o badanym obiekcie oraz określenie związków przyczynowych pomiędzy charakteryzującymi go czynnikami.

Opracowanie programu badań doświadczalnych powinno

być poprzedzone szczegółową analizą czynnikową, polegającą na jakościowym ustaleniu zależności pomiędzy czynnikami mającymi wpływ na badany obiekt. Dla każdego badanego obiektu można dokonać określonego podziału czynników [54], mających wpływ na badany proces. Podział taki przedstawiono schematycznie na rys. 13.



Rys. 13. Ogólny schemat strukturalny obiektu badań

Na rysunku tym poszczególne symbole oznaczają:

- X_i (x_1, x_2, \dots, x_i) zbiór czynników badanych /niezależnych/: są to czynniki, które pozwalają na celową i kontrolowaną zmianę ich wartości;
- Z_k (z_1, z_2, \dots, z_k) zbiór czynników wynikowych /zależnych/: są to czynniki, których wartości zależą od wartości czynników badanych;

- $C_c (c_1, c_2, \dots, c_2)$ zbiór czynników stałych: są to czynniki, których wartości nie zmieniają się w czasie pomiarów i stanowią tzw. warunki badań;
- $H_h (h_1, h_2, \dots, h_h)$ zbiór czynników zakłócających: są to czynniki, które wpływają niekorzystnie na badany obiekt, są przyczyną błędów przypadkowych powodujących rozrzut wyników pomiarów w trakcie realizacji badań doświadczalnych.

Wymienione wyżej czynniki, charakteryzujące stan obiektu badań można powiązać z sobą w postaci funkcyjnej zależności, wprowadzając pojęcie modelu matematycznego.

$$z = F(x_i, c_c, h_h) \quad /1.16./$$

gdzie:

- z - czynnik wynikowy
- x_i - zbiór czynników badanych ($i = 1, 2, 3, \dots, h$)
- c_c - zbiór czynników stałych
- h_h - zbiór czynników zakłócających

Po zrealizowaniu badań doświadczalnych wg określonego programu, funkcja /1.16./ przyjmie postać np. wielomianu określonego konkretnymi wartościami liczbowymi.

Każde narzędzie pomiarowe, którym jest również stanowisko badawcze, nazwane laboratoryjnym modelem interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, a który będziemy dalej nazywać krótko interferometrem, można scharakteryzować ważniejszymi cechami [36, 55, 60, 73]:

A. METROLOGICZNYMI - od których uzależniony jest wynik pomiaru. Wśród tych cech należy wyróżnić następujące ważniejsze własności:

- dokładność interferometru
- zakres pomiarowy interferometru
- czułość interferometru

B. UŻYTKOWYMI - które są miernikiem wartości eksploatacyjnych interferometru. Wśród tych cech należy wyróżnić następujące ważniejsze własności:

- niezawodność interferometru
- trwałość interferometru; czyli odporność na rozregulowanie, uszkodzenia, itd.
- dogodność użytkowania interferometru; czyli łatwość justowania, montażu, konserwacji, naprawiania, przechowywania, itd.
- bezpieczeństwo użytkowania interferometru.

C. EKONOMICZNYMI - które dotyczą kosztów nabycia i kosztów eksploatacji.

Zgodnie z ustalonym zakresem pracy cechy metrologiczne laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego wymienione w p. A oraz optymalne warunki określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, zostaną określone doświadczalnie. Cechy wymienione w p. B i C z uwagi na podstawowy charakter zagadnienia nie będą rozważane /nie wiążą się bezpośrednio z zakresem i celem pracy/.

DOKŁADNOŚĆ INTERFEROMETRU HOLOGRAFICZNEGO

Zgodnie z PN-71/M-02050^{*/} dokładność interferometru można zdefiniować jako właściwość charakteryzującą zdolność interferometru do wskazywania wartości wielkości bliskich rzeczywistej wartości wielkości mierzonej, czyli do wskazywania poprawnych wartości wielkości mierzonej. Dokładność wskazań interferometru jest tym większa im wskazania są bliższe rzeczywistej wartości wielkości mierzonej i jest ona sumaryczną właściwością interferometru z punktu widzenia jego błędów. Ilościową ocenę dokładności określają tzw.

*/Patrz str. 55

graniczne błędy dokładności, które zgodnie z PN-71/N-02050 są zespołem dwóch wielkości otrzymanych jedna przez dodanie do błędu poprawności wartości bezwzględnej błędu granicznego wierności, natomiast druga przez odjęcie od błędu poprawności wartości bezwzględnej błędu granicznego wierności. Dla określenia dokładności interferometru holograficznego należy zatem określić poprawność oraz wierność tego interferometru.

A. Poprawność interferometru holograficznego

Zgodnie z PN-71/N-02050 poprawność interferometru charakteryzuje zdolność interferometru do wskazywania poprawnych wartości wielkości mierzonej bez uwzględnienia błędu wierności wskazań. Ilościowo poprawność interferometru określa błąd poprawności, który jest sumą algebraiczną wszystkich błędów systematycznych interferometru holograficznego w określonych warunkach użytkowania. W rozważanym przez nas przypadku należy wyróżnić dwa podstawowe rodzaje takich błędów:

1. Błąd poprawności przyrządu do ustalania próbek na interferometrze holograficznym $\alpha_{pp}^{**/}$,
2. Błąd wskazania interferometru holograficznego, będący różnicą pomiędzy wartością wskazaną przez interferometr a wartością poprawną wielkości mierzonej dla określonego kąta padania wiązki przedmiotowej - $\alpha_{p_4}^{***/}$

Całkowity błąd poprawności interferometru wynosi zatem:

^{**/}PN-71/N-02050 - Metrologia. Nazwy i określenia.

^{***/}Szczegółowa analiza błędu poprawności przyrządu jest przeprowadzona w załączniku do niniejszej pracy

^{***}/ Definicję tę zaproponowano na podst. normy PN-71/N-02050

$$\alpha_p = \alpha_{p_p} + \alpha_{p_4} \quad /1.17./$$

gdzie:

$$\alpha_{p_p} = \alpha_{p_1} + \alpha_{p_2} + \alpha_{p_3}$$

zgodnie ze wzorem /1.01./ wyprowadzonym w załączniku do niniejszej pracy, opisującym przyrząd do ustalania próbek; poszczególne rodzaje błędów poprawności pochodzące od przyrządu do ustalania próbek na interferometrze holograficznym, mają charakter błędów systematycznych stałych [36] i zostały wyznaczone na drodze analitycznej. Zostały tam wyznaczone poszczególne rodzaje błędów poprawności, które wpływają na całkowity błąd poprawności interferometru holograficznego.

Drugi rodzaj błędów, które wpływają na poprawność interferometru holograficznego, mają charakter błędów systematycznych zmiennych [36]. Błędy te zostaną wyznaczone na drodze doświadczalnej. Znajomość tych błędów umożliwi nam uwzględnienie ich w postaci poprawki ^{*/} na poprawność interferometru holograficznego i wyeliminowanie wpływu błędów systematycznych na wynik pomiaru.

B. Wierność interferometru holograficznego

Zgodnie z PN-71/N-02050 wierność interferometru charakteryzuje zdolność interferometru do dwania zgodnych pomiędzy sobą wskazań dla tej samej wartości wielkości mierzonej, bez uwzględnienia błędu poprawności interferometru. Ilościowo wierność interferometru określa błąd wierności, który jest jednym ze wskaźników rozrzutu wskazań interferometru, tzn. zmienności wyników pomiaru interferometrem w serii pomiarów tej samej wartości wielkości mierzonej. Przyjmuje się zwykle odchylenie średnie kwadratowe poje-

^{*/} Poprawka zgodnie z PN-71/N-02050 jest to wartość, którą należy dodać algebraicznie do wartości średniej wskazań interferometru w celu uzgodnienia jej z wartością poprawną wielkości mierzonej. Poprawka na poprawność interferometru jest równa jego błędowi ze zmienionym znakiem.

dynczego wskazania, które nazywa się wówczas "średnim błędem kwadratowym wierności wskazań" dla serii dziesięciu kolejnych wskazań w określonych warunkach użytkowania interferometru [55, 73].

$$S = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (n_i - \bar{n})^2} \quad /1.18./$$

gdzie:

n_i - wartość kolejnego wskazania $i = 1, 2, \dots, r; r = 10$

\bar{n} - średnia arytmetyczna wartości powyższych wskazań interferometru

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^{10} n_i}{10}$$

Najczęściej podaje się błędy graniczne wierności wskazań interferometru. Błędy graniczne wierności wskazań oblicza się jako iloczyn średniego błędu kwadratowego wierności wskazań w danej serii wskazań i liczby t , określonej przy zagrożonym poziomie istotności α na podstawie rozkładu t -Studenta dla określonej liczby stopni swobody f , zwanej dalej statystyką t -Studenta.

$$e = \pm t_{\alpha, f} \cdot S \quad /1.19./$$

gdzie:

$t_{\alpha, f}$ - wartość tabelaryczna statystyki t -Studenta, na poziomie istotności α oraz f stopni swobody: $f = r - 1$, gdzie: r - liczba pomiarów w serii,

S - średni błąd kwadratowy wierności wskazań

Ponadto podaje się zakres rozrzutu wskazań interferometru, który określa się zgodnie z PN-71/W-02050 jako różnicę mię-

dzy największym i najmniejszym spośród wskazań w danej serii pomiarów, odpowiadających tej samej wartości mierzonej.

$$W = n_{i_{\max}} - n_{i_{\min}} \quad /1.20./$$

gdzie:

$n_{i_{\max}}$ - maksymalne wskazanie interferometru w danej serii pomiarów,

$n_{i_{\min}}$ - minimalne wskazanie interferometru w danej serii pomiarów

Odległość między dwoma sąsiednimi prążkami interferencyjnymi /jasnym i ciemnym/, zgodnie z wzorem /1.09/, p.1.1.1, określa zależność:

$$S_{p-(2p-1)} = \frac{\lambda}{4 \sin \varphi \cos \beta}$$

Z zależności tej, dla danego kąta klina φ oraz kąta padania β można wyznaczyć nominalną ilość prążków interferencyjnych n_T na długości ramienia klina L , którą powinien interferometr wskazać przy bezbłędnym pomiarze /tzn. gdy błąd dokładności interferometru równy jest zeru/, mianowicie:

$$n_T = \frac{L}{S_{p-(2p-1)}} \quad /1.21./$$

Uwzględniając zależność /1.09./ otrzymamy wzór na nominalną ilość prążków interferencyjnych dla danego kąta klina φ , kąta padania β i danej długości fali λ na długości ramienia klina interferencyjnego L , którą można wyznaczyć doświadczalnie. Wynik takiego pomiaru przyjmuje się jako rzeczywistą wartość wielkości mierzonej, która pozwoli nam na wyznaczenie błędu dokładności wskazań, tzn. błędu poprawności wskazań jak również błędu wierności wskazań laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego do okreś-

lania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn. Sposób ten jest stosowany w pomiarach laboratoryjnych przy wzorcowaniu narzędzi pomiarowych itd. [61], gdzie rzeczywista wartość wielkości zostaje wyznaczona inną dokładniejszą metodą pomiarową. Ostatecznie wzór na nominalną ilość prążków interferencyjnych ma postać:

$$n_T = \frac{4L \sin \varphi \cos \beta}{\lambda} \quad /1.22./$$

Z zależności tej widać, że nominalna ilość prążków jest funkcją czterech wielkości

$$n_T = F(L, \varphi, \beta, \lambda)$$

Z uwagi na pośredni charakter wyznaczania wartości n_T , tzn. przez wyznaczenie φ, β, L , wartość ta będzie obarczona błędem pochodzącym od niedokładności pomiaru wartości φ, β, L . Oznaczając błąd nominalnej ilości prążków, n_T przez Δn_T oraz odpowiednio błędy pomiaru wartości φ, β, L przez $\Delta \varphi, \Delta \beta, \Delta L$ możemy napisać ogólne wyrażenie określające błąd nominalnej wartości n_T [73]:

$$\Delta n_T = \pm \left(\left| \frac{\partial f}{\partial L} \Delta L \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial \cos \beta} \Delta \beta \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial \sin \varphi} \Delta \varphi \right| \right)$$

Po zróżniczkowaniu /1.22./ otrzymamy:

$$\Delta n_T = \pm \left(\left| \frac{4 \cos \beta \sin \varphi}{\lambda} \Delta L \right| + \left| - \frac{4L \sin \beta \sin \varphi}{\lambda} \Delta \beta \right| + \left| \frac{4L \cos \beta \cos \varphi}{\lambda} \Delta \varphi \right| \right) \quad /1.23./$$

Jeżeli średnia arytmetyczna wskazań otrzymanych za pomocą interferometru w jednej serii kolejnych pomiarów tej samej wartości wielkości mierzonej, wykonanych w normalnych warunkach użytkowania interferometru dla określonych wartości φ, β, L , będzie się mieściła w granicach:

$$n_T - \Delta n_T \leq \bar{n}_d \leq n_T + \Delta n_T \quad /1.24./$$

to można pominąć błąd poprawności interferometru. Wówczas błąd dokładności interferometru będzie się równał błędowi wierności wskazań interferometru.

Ponieważ błąd poprawności interferometru ma charakter błędów systematycznych postępowych [36], tzn. błąd ten rośnie lub maleje w funkcji wzrastających odchyłek kształtu a więc w funkcji wzrastającej ilości prążków, wygodnie jest podawać błąd poprawności wskazań interferometru w postaci względnego błędu poprawności, który zgodnie z PN/71/N-02050, wynosi:

$$\xi = \frac{\bar{n}_d - n_T}{n_T} \cdot 100\% \quad /1.25./$$

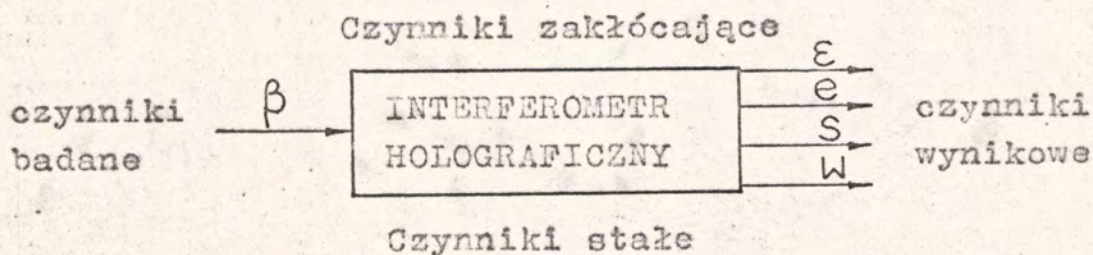
gdzie:

\bar{n}_d - średnia arytmetyczna wskazań interferometru w jednej serii kolejnych pomiarów:

$$\bar{n}_d = \frac{\sum_{i=1}^r n_{di}}{r}$$

n_{di} - kolejne wskazanie interferometru
($i = 1, 2, \dots, r$),
 r - ilość pomiarów

Ostatecznie dla określenia dokładności laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego dokonano następującego podziału czynników biorących udział w procesie, przedstawionego schematycznie na rys. 14.



Rys. 14. Analiza czynnikowa dokładności interferometru holograficznego

Zgodnie z powyższym schematem czynniki biorące udział w procesie podzielono na:

I. Czynniki badane:

1. Kąt padania wiązki przedmiotowej - β

II. Czynniki wynikowe:

1. Względny błąd poprawności wskazań - ϵ
2. Błędy graniczne wierności wskazań - e

Dodatkowymi czynnikami wynikowymi są:

3. Średni błąd kwadratowy wierności wskazań - S
4. Zakres rozrzutu wskazań - W

III. Czynniki stałe:

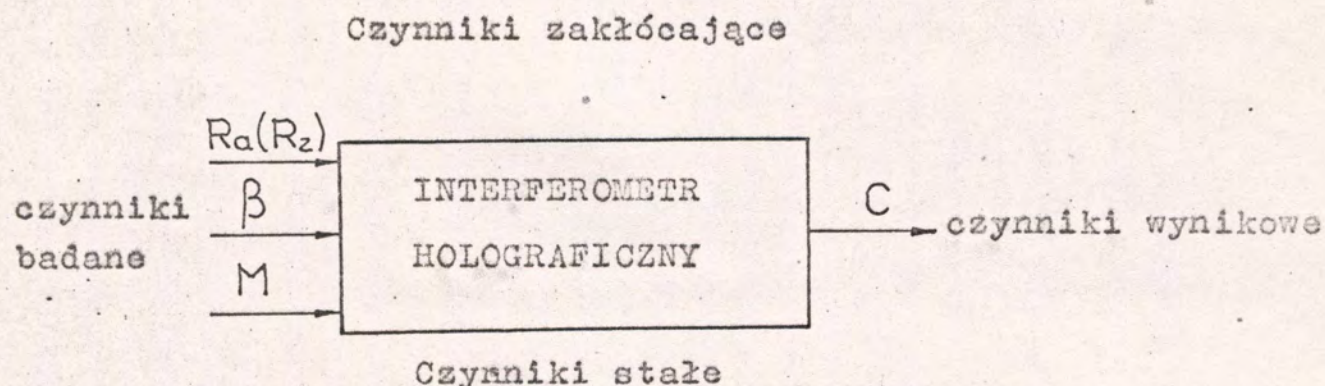
1. Laser He-Ne,
2. Stałe warunków pomiarów:
 - temperatura $20 \pm 2^\circ \text{C}$ ($293, 15^\circ \text{K}$)
 - ciśnienie 760 mm Hg ($102\,324, 72 \text{ [Pa]}$)
 - wilgotność $55 \pm 5 \%$
3. Kształt wiązek światła - wiązka przedmiotowa będzie wiązką rozbieżną, tzn. fala kulista o dużym promieniu krzywizny

IV. Czynniki zakłócające:

1. Niestabilność lasera
2. Turbulencja powietrza
3. Stan emulsji fotograficznej, czyli:
 - skład emulsji
 - obróbka fotochemiczna
 - kurczenie się emulsji
4. Niestabilność interferometru:
 - względne przemieszczanie się wiązek światła
 - przemieszczanie się płyty fotograficznej
 - przemieszczanie się względem siebie elementów wchodzących w skład interferometru holograficznego

5. Wstrząsy, drgania i inne zakłócenia wpływające na dokładność interferometru

Dla określenia optymalnych warunków holograficznego procesu wyznaczania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn oraz zakresu pomiarowego laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego dokonano następującego podziału czynników biorących udział w procesie, przedstawionego schematycznie na rys. 15.



Rys. 15. Analiza czynnikowa optymalizacji i zakresu pomiarowego interferometru holograficznego

W procesie tym:

I. Czynniki badane są:

1. Chropowatość badanych powierzchni - $R_a(R_z)$
2. Kąt padania wiązki przedmiotowej - β
3. Rodzaj materiału - M

II. Czynnikiem wynikowym jest:

1. Kontrast prążków interferencyjnych - c

III. Czynniki stałe są:

1. Materiał fotograficzny: płyty i odczynniki chemiczne

2. Technologia obróbki fotochemicznej /pozostałe czynniki stałe jak w poprzednim procesie/

IV. Czynniki zakłócające:

1. Różnica w długości dróg optycznych wiązki przedmiotowej i wiązki odniesienia
2. Nieczystość badanych powierzchni, elementów optycznych interferometru i otoczenia, itd. /pozostałe czynniki zakłócające jak w poprzednim procesie/.

Ustalono, że badania zostaną przeprowadzone przy użyciu lasera He-Ne o mocy około 10 [mW]. Hologramy wykonane będą na płytach fotograficznych firmy AGVA-GEVAERT typ 10E75A.H. Proces obróbki fotochemicznej płyt fotograficznych prowadzony będzie wg procedury stosowanej w Pracowni Holografii Zakładu Optyki Fizycznej Centralnego Laboratorium Optyki w Warszawie. Wiązka światła przedmiotowa jak również wiązka światła odniesienia będzie rozbieżna - fala kulista. Zastosowanie fali kulistej do formowania wiązki przedmiotowej wynika z trudności uzyskania równoległej wiązki światła - fali płaskiej w przypadku badania dużych powierzchni. Stosując do tego celu falę kulistą, czyli rozbieżną wiązkę światła, nie ma ograniczeń pod względem wielkości badanych powierzchni. Należy jednak liczyć się z faktem, że konsekwencją zastosowania wiązki przedmiotowej rozbieżnej - fali kulistej może być obniżenie się dokładności pomiarów. Dlatego należy pamiętać, aby źródło fali kulistej, użyte do formowania wiązki przedmiotowej, znajdowało się w znacznej odległości od badanej powierzchni. Z drugiej strony zastosowanie wiązki rozbieżnej powoduje, że interferogram, obserwowany np. na ekranie, zostaje powiększony, co jest niewątpliwą zaletą, ponieważ przy dużym zagęszczeniu prążków odpowiednie ustawienie ekranu umożliwia łatwą obserwację obrazu interferencyjnego. W celu uzyskania maksymalnej wy-

dajności dyfrakcyjnej hologramu przyjęto, zgodnie z danymi literaturowymi, kąt między interferującymi wiązkami światła $30 + 40^\circ$. Ograniczenie od dołu wynika z faktu pojawienia się dla mniejszych kątów dodatkowych ugięć światła podczas procesu rekonstrukcji hologramu, które mogłyby stanowić źródło dodatkowych szumów. Ograniczenie od góry wynika z faktu obniżania się wydajności dyfrakcyjnej hologramów.

1.3. Wnioski i zalecenia do badań własnych

Przeprowadzona powyżej analiza teoretyczna, która obejmowała analizę:

- metod interferometrii klasycznej określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn w metrologii warsztatowej,
- holograficznych metod interferometrycznych w aspekcie zastosowania ich do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn w metrologii warsztatowej oraz
- analizę dokładności i metodyki badań,

wykazała celowość podjęcia próby rozszerzenia możliwości określania niepłaskości powierzchni metodą interferometrii klasycznej do bardziej ogólnego przypadku powierzchni trójwymiarowych przez zastąpienie metody interferometrii klasycznej metodą interferometrii holograficznej. Z przeprowadzonej analizy wyciągnięto wnioski, że badania należy prowadzić "w czasie rzeczywistym" i że należy je przeprowadzić w dwóch etapach:

W pierwszym etapie należy rozwiązać problem dokładnego ustalania kontrolowanych powierzchni części maszyn oraz dokładnego ustalania hologramów, aby zapewnić adekwatność przeprowadzanych pomiarów.

W drugim etapie należy określić dokładność laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn oraz ustalić optymalne warunki procesu i zakres pomiarowy interferometru. Badania optymalizacyjne i zakresu pomiarowego interferometru postanowiono przeprowadzić:

- bez stosowania filtracji częstości przestrzennych,
- z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych.

W przeprowadzonej analizie czynnikowej w p.1.2. określono zespół czynników badanych, które mogą mieć wpływ na badany proces. Czynniki te należy poddać badaniom rozpoznawczym w celu doświadczalnego stwierdzenia, które z tych czynników mają istotny wpływ na badany proces i powinny być przedmiotem dalszych, bardziej szczegółowych badań celem ustalenie zależności matematycznych, a które z nich mogą być pominięte jako czynniki wywierające nieistotny wpływ.

W przeprowadzonej analizie czynnikowej określono też zespół czynników stałych i zakłócających. Z uwagi na dużą różnorodność możliwych zakłóceń, zwiększających rozrzut wyników pomiarów, w badaniach doświadczalnych należy uwzględnić metody rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej jak również metody analizy regresji.

1.4. Hipotezy pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy teoretycznej zagadnienia wysunięto następujące podstawowe hipotezy:

1. Adekwatne określanie topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn z zastosowaniem holograficznej metody interferometrycznej jest możliwe przy takiej geometrii układu, która zapewni realizację dokładnego ustalania badanych powierzchni oraz hologramów.
2. Dokładność holograficznej metody określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn zależy nie tylko od geometrii układu, ale również od warunków pomiarów.
3. Spośród wszystkich możliwych położzeń powierzchni wzorcowej istnieje takie położenie, które pokrywa się z powierzchnią odniesienia ^{*/}.
4. Dla każdej powierzchni o określonej chropowatości można dobrać optymalne warunki procesu, przy których przebieg holograficznego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn będzie najkorzystniejszy.

^{*/} Powierzchnia odniesienia jest to powierzchnia stykająca się z powierzchnią rzeczywistą na zewnątrz materiału i tak względem niej usytuowana aby największa odległość pomiędzy nią a powierzchnią rzeczywistą była najmniejsza spośród wszystkich możliwych położzeń odpowiadających różnym położeniom powierzchni odniesienia /warunek minimum odchyłki/ [29]. Przy takim położeniu jest spełniony warunek najlepszego dopasowania powierzchni wzorcowej /minimalna ilość prążków interferencyjnych/ przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn.

2. BADANIA WŁASNE

Zgodnie z przyjętym celem pracy oraz wnioskami z przeprowadzonej analizy teoretycznej zagadnienia w p. 1.3. badania doświadczalne podzielone zostały na dwa główne etapy:

- I. Badania wstępne, których celem jest potwierdzenie pierwszej hipotezy, przez ogólną ocenę wierności zestawionego stanowiska badawczego w określonych warunkach pracy.
- II. Badania podstawowe obejmujące badania właściwe, a którym celem jest:
 - określenie dokładności laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego,
 - optymalizacja warunków holograficznego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn,
 - określenie zakresu pomiarowego laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego przez ustalenie wpływu różnych czynników stanowiących warunki realizacji określania topografii błędów kształtu wybranych powierzchni części maszyn.

Podana została metodyka pomiarów wielkości mierzalnych łącznie z analizą ich dokładności oraz przeprowadzona została szczegółowa analiza statystyczna wyników badań rozpoznawczych i właściwych stanowiących podstawę do wyciągania wniosków końcowych.

2.1. Badania wstępne

Analiza teoretyczna zagadnienia /rozd. 1/ wykazała, że w celu adekwatnego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn za pomocą holograficznej metody interferometrycznej należy w pierwszej kolejności rozwiązać problem dokładnego ustalania kontrolowanych powierzchni części maszyn oraz hologramów. Badania wstępne będą miały na celu ogólne potwierdzenie hipotezy, że adekwatne określenie topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn z zastosowaniem holograficznej metody interferometrycznej jest możliwe przy takiej geometrii zestawionego stanowiska do badań, która zapewni realizację dokładnego ustalania badanych powierzchni oraz hologramów. Pozytywny wynik badań wstępnych był warunkiem koniecznym rozpoczęcia następnego etapu badań.

2.1.1. Ustalanie kontrolowanych powierzchni części maszyn

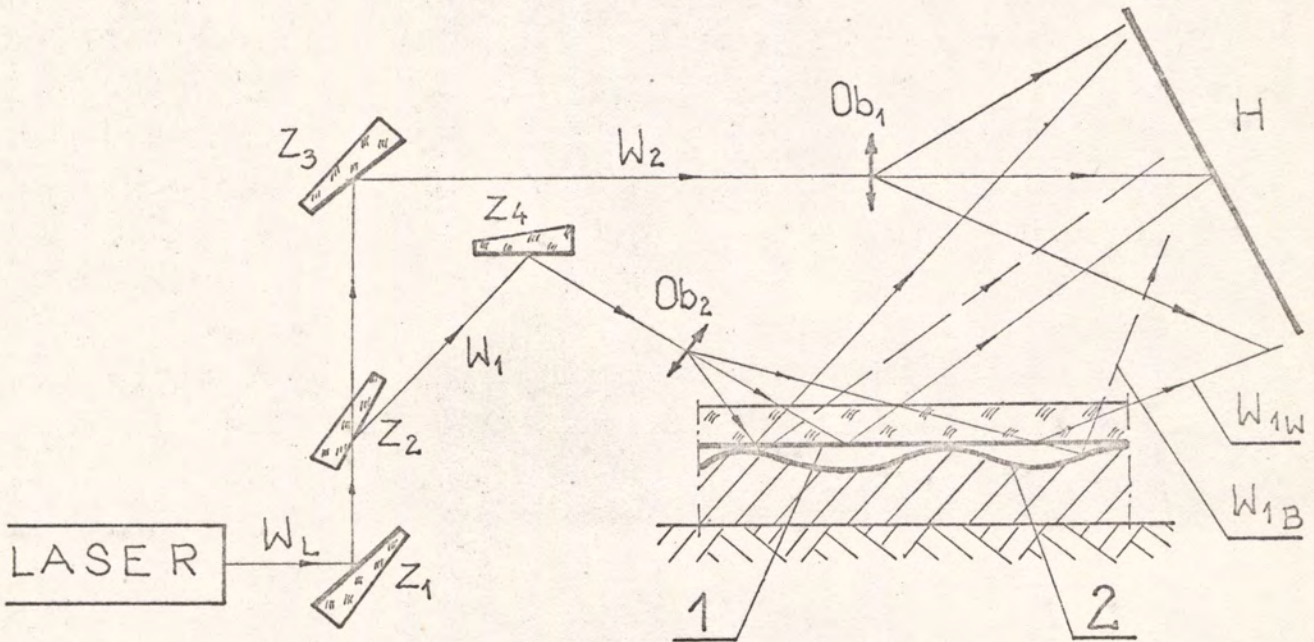
Po dokładnej i szczegółowej analizie tego zagadnienia zaproponowano trzy sposoby rozwiązania problemu dokładnego, powtarzalnego ustalania kontrolowanych części maszyn, mianowicie:

1. Sposób pomiaru błędów kształtu I [46] ,
2. Sposób pomiaru błędów kształtu II [47] ,
3. Przyrząd do ustalania próbek na interferometrze holograficznym.

Ad 1. Sposób pomiaru błędów kształtu I, jest przedmiotem patentu UP PRL nr 86837 /autor B. Bednarz, właściciel Politechniki Krakowskiej/.

Sposób ten pozwala na adekwatne określenie topografii błędów kształtu powierzchni bez konieczności zamiany powierzchni wzorcowej na powierzchnię badaną, czyli bez obawy

popęknienia błędów spowodowanych niedokładnością ustalenia badanej powierzchni /rys. 16/.



Rys. 16. Sposób pomiaru błędów kształtu I.

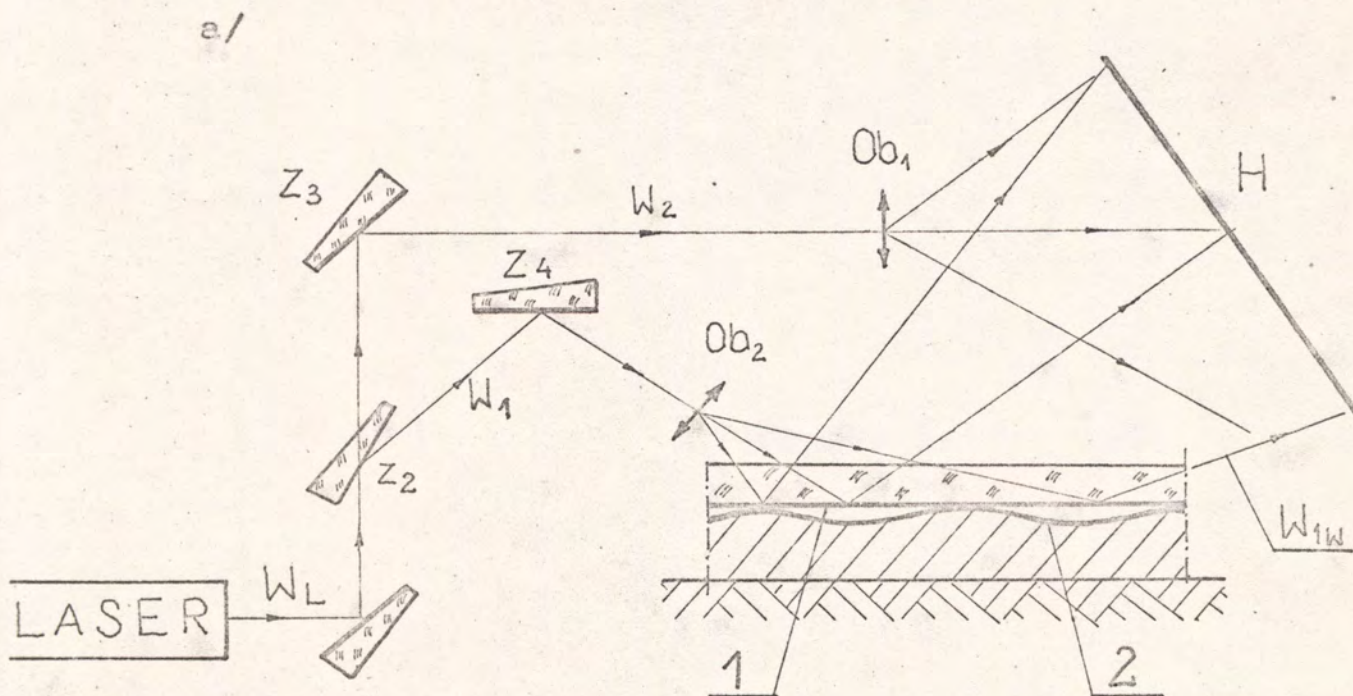
Opis:

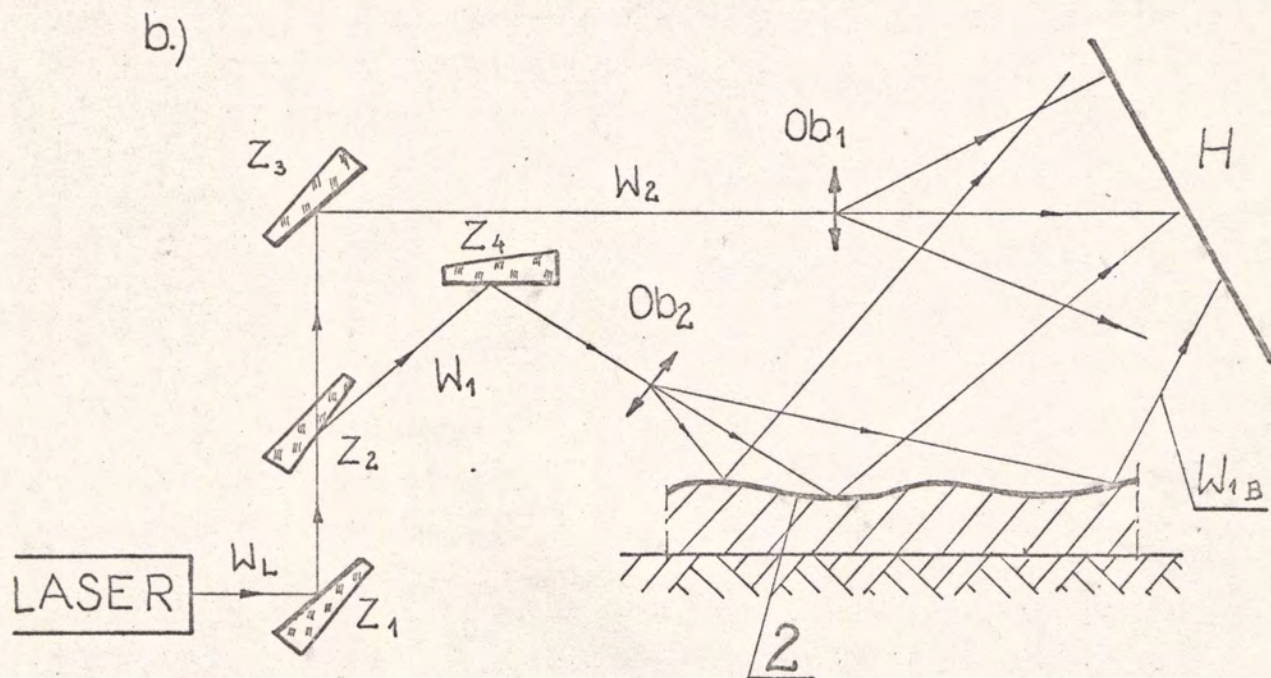
Wiązka światła spójnego W_L z lasera jest kierowana przez zwierciadko Z_1 na zwierciadko częściowo przepuszczające Z_2 . Wiązka W_1 odbita od zwierciadka Z_2 jest kierowana przez zwierciadko Z_4 oraz układ formułujący Ob_2 na powierzchnię wzorcową 1 częściowo przepuszczającą oraz powierzchnię badaną 2. Odbita od powierzchni wzorcowej 1, wiązka przedmiotowa wzorcowa W_{1W} , oraz odbita od powierzchni badanej 2, wiązka przedmiotowa badana W_{1B} , są kierowane na płytę fotograficzną H . Druga część wiązki W_L przepuszczona przez zwierciadko Z_2 , czyli wiązka odniesienia W_2 jest kierowana przez układ formułujący Ob_1 bezpośrednio na płytę fotograficzną H . Ekspozycję wykonuje się

jednocześnie dla obu powierzchni: wzorcowej i badanej, po czym wykonuje się obróbkę fotochemiczną płyty fotograficznej H. Po odtworzeniu hologramu otrzymuje się interferogram błędów kształtu badanej powierzchni.

Ad.2. Sposób pomiaru błędów kształtu II, jest przedmiotem patentu UP PRL nr 86868 /autor B. Bednarz, właściciel Politechniki Krakowska/.

Sposób ten pozwala na adekwatne określenie topografii błędów kształtu powierzchni bez obawy popełnienia błędów spowodowanych niedokładnym ustaleniem powierzchni wzorcowej lub powierzchni badanej do drugiej ekspozycji albo obserwacji w czasie rzeczywistym dzięki temu, że drugą ekspozycję lub obserwację przeprowadza się dla powierzchni, która jest bazą dla powierzchni wzorcowej w czasie pierwszej ekspozycji /rys. 17/





Rys. 17. Sposób pomiaru błędów kształtu II

a/ wykonanie ekspozycji dla powierzchni wzorcowej /hologramu/

b/ wykonanie ekspozycji dla powierzchni badanej /obserwacja w czasie rzeczywistym/.

Opis:

Wiązka światła spójnego W_L /rys. 17a/ z lasera jest kierowana przez zwierciadko Z_1 na zwierciadko częściowo przepuszczające Z_2 . Wiązka W_1 odbita od zwierciadka Z_2 jest kierowana przez zwierciadło Z_4 oraz układ formułujący Ob_2 na powierzchnię wzorcową 1, całkowicie odbijającą. Wiązka W_1 odbita od powierzchni wzorcowej jest kierowana na płytę fotograficzną H. Druga część wiązki W_1 , która została przepuszczona przez zwierciadło Z_2 czyli wiązka odniesienia W_2 jest kierowana przez zwierciadło Z_2 oraz układ formułujący Ob_1 bezpośrednio na płytę fotograficzną H. Po wykonaniu eks-

pozycji dla powierzchni wzorcowej 1, nie zmieniając geometrii układu optycznego zdejmujemy wzorzec z powierzchni badanej 2 i wykonujemy drugą ekspozycję dla powierzchni badanej /rys. 17 b/. Po wykonaniu drugiej ekspozycji lub bezpośrednio po wykonaniu ekspozycji dla powierzchni badanej przeprowadzamy obróbkę fotochemiczną płyty fotograficznej H. Po odtworzeniu hologramu otrzymujemy interferogram błędów kształtu badanej powierzchni.

Przedstawione wyżej sposoby rozwiązania problemu dokładnego ustalania kontrolowanych powierzchni części maszyn zostały dokładnie zbadane w Pracowni Holografii Zakładu Optyki fizycznej Centralnego Laboratorium Optyki w Warszawie. Badania te wykazały, że:

- 1/ Kilkakrotnie wykonane pomiary dla tej samej powierzchni badanej dawały różne wyniki. Topograficzne obrazy błędów kształtu badanych powierzchni obciążone były szumami w postaci dodatkowych prążków interferencyjnych.
- 2/ Wycieranie się warstwy odbijającej lub częściowo odbijającej na powierzchni wzorcowej powoduje obniżenie się kontrastu prążków interferencyjnych aż do zupełnego ich zaniku.
- 3/ W sposobie drugim dla skompensowania różnicy dróg optycznych wiązek W_{1W} i W_{1B} po zdjęciu powierzchni wzorcowej z powierzchni badanej należy wprowadzić do układu optycznego dodatkowe elementy kompensujące.

Analiza wyników tych badań wykazała, że pojawienie się szumów w obrazie prążków interferencyjnych jest spowodowane:

- obecnością zanieczyszczeń, np. drobnych pyłków między stykającymi się powierzchniami,
- niejednorodnością materiału, z którego wykonana była powierzchnia wzorcowa,

- różnicą dróg optycznych wiązek W_{1W} i W_{1B} po zdjęciu powierzchni wzorcowej z powierzchni badanej w drugim sposobie.

Ponadto stwierdzono, że:

- z uwagi na różną chropowatość badanych powierzchni należałoby dobrać dla określonej chropowatości optymalną przepuszczalność powierzchni wzorcowej, co wiąże się w sposobie pierwszym z wykonaniem dużej ilości powierzchni wzorcowych,
- rozwiązania te trudno byłoby uogólnić na przypadek powierzchni trójwymiarowych ze względu na trudności wykonania tych powierzchni wzorcowych.

Mimo, że wiele z wymienionych wad można by było usunąć oraz mimo prostoty realizacji tych rozwiązań postanowiono szukać innych rozwiązań problemu dokładnego ustalania badanych powierzchni. Zaproponowano konstrukcję specjalnego przyrządu do ustalania próbek /badanych powierzchni/ na interferometrze holograficznym, przy czym przyjęto następujące założenia wstępne, które konstrukcja ta powinna zapewniać:

- 1/ Minimalny błąd dokładności ustalenia badanych powierzchni /założono, że błędy graniczne dokładności nie mogą przekroczyć $\pm 0,15$ [μm]/.
- 2/ Możliwość realizacji dokładnych przemieszczeń kątowych względem wszystkich osi układu współrzędnych oraz przemieszczeń liniowych w wyróżnionym kierunku w celu ustalenia powierzchni wzorcowej, tak aby każdorazowo pokrywała się z powierzchnią odniesienia.
- 3/ Kasowanie luzów pomiędzy wszystkimi częściami współpracującymi ze sobą.

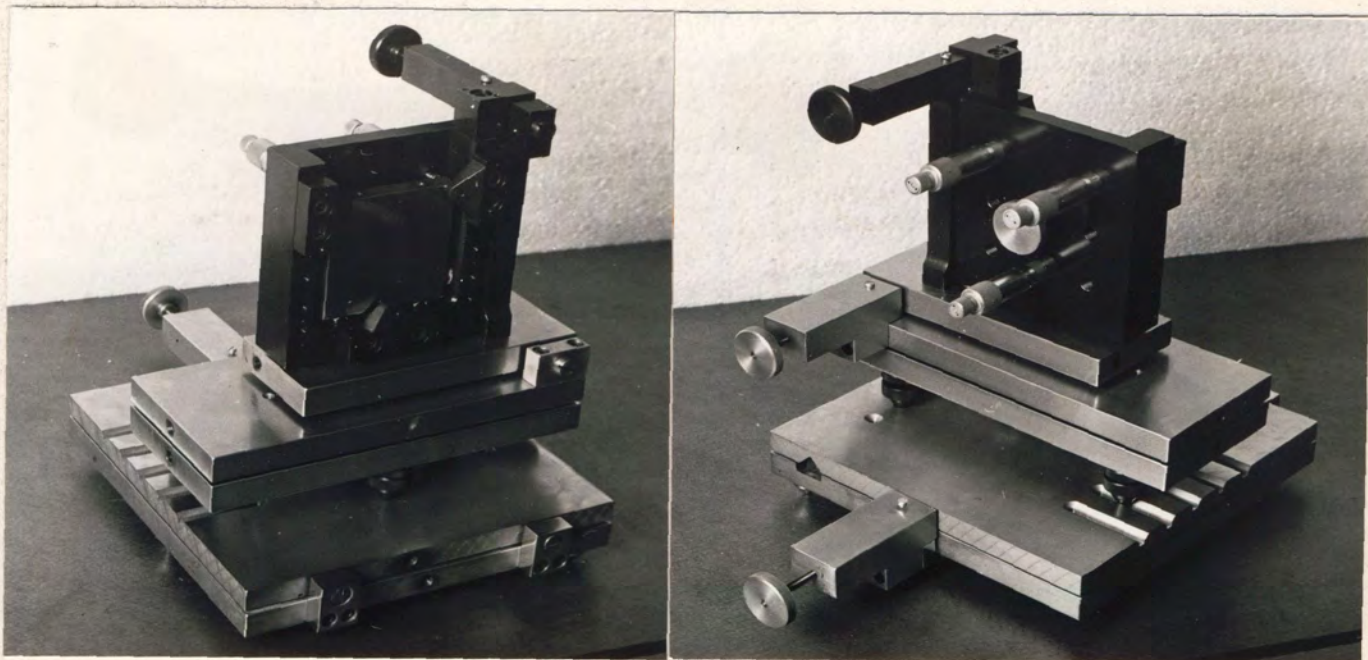
Ponadto konstrukcja powinna się charakteryzować:

- prostotą i zwartością budowy,
- uniwersalnością /służyć do ustalania nie tylko powierzchni płaskich/,
- łatwością montażu i przezbrajania,
- bezpieczeństwem i wygodą obsługi,
- łatwością ustawiania i transportu,
- estetyką wykonania części oraz całego przyrządu.

Biorąc to pod uwagę zaproponowano trzy warianty rozwiązań konstrukcyjnych, z których po dokładnej analizie wybrano jeden. Po opracowaniu dokumentacji prototypu, przyrząd został wykonany w Fabryce Wtryskarek PONAR-ZYWIEC. Ogólny widok tego przyrządu jest pokazany na rys. 18.

a/

b/



Rys. 18. Przyrząd do ustalania próbek na interferometrze holograficznym:
a/ widok z przodu
b/ widok z tyłu

Następnie w Zakładzie Metrologii Warsztatowej Instytutu Technologii Maszyn Politechniki Krakowskiej przeprowadzono badania przyrządu. Konstrukcja, analiza dokładności oraz badania przyrządu łącznie z ich analizą statystyczną wykracają poza zakres pracy. Są one dołączone w postaci załącznika, tu zaś ograniczymy się do podania tylko podstawowych wyników tych badań.

Analiza statystyczna wyników badań przyrządu wykazała, że zakres błędów granicznych wierności ustaleń próbki w przyrządzie nie przekracza $\pm 0,15$ [μm] na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Ponieważ na całkowity błąd wierności interferometru mają wpływ jeszcze inne czynniki /wymienione w p.1.2/, dlatego w ramach badań własnych przeprowadzono badania wstępne w celu ogólnego potwierdzenia pierwszej hipotezy, przy czym:

- badania przeprowadzono dla normalnego kąta padania wiązki przedmiotowej, z uwagi na największą czułość metody przy tym kącie,
- badania przeprowadzono na wzorcowej powierzchni płaskiej.

Zakres badań wstępnych objął ilościowe określenie wierności zestawionego dla tego celu stanowiska badawczego, przez wyznaczenie błędów granicznych wierności dla serii 10 ustaleń powierzchni wzorcowej. Dokładne analiza czynnikowa obiektu badań została przeprowadzona w p. 1.2, w dalszej części pracy została ona więc pominięta.

Ponieważ jednak badania wstępne mają na celu ilościowe określenie wpływu czynników zakłócających na rozrzut wskazań stanowiska badawczego, należy zatem określić jaka jest zmienność wyników pomiaru zestawionego stanowiska badawczego dla danej serii pomiarów tej samej wartości wielkości mierzonej. Najczęściej podaje się, zgodnie z PN-71/N-02050, błędy graniczne wierności wskazań zestawionego stanowiska, które oblicza się jako iloczyn średniego błędu kwadratowego

wierności wskazań dla danej serii pomiarów i statystyki t-Studenta na poziomie istotności α dla określonej liczby stopni swobody f , czyli zgodnie ze wzorem /1.19./, p. 1.2. mamy:

$$e_{st} = t_{\alpha, f} s \quad [\mu\text{m}]$$

Pomiary zgodnie z [55, 73] przeprowadzono dla serii 10 ustaleń powierzchni wzorcowej, zatem

$$s = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (\Delta h_i - \Delta \bar{h})^2} \quad [\mu\text{m}]$$

gdzie:

Δh_i - zmiana odchyłki kształtu, odpowiadająca z_i ilości prążków interferencyjnych wskazanych przez zestawione stanowisko badawcze,

$$\Delta h_i = z_i \Delta h_{p-(2p-1)} = z_i \frac{\lambda}{4} \quad [\mu\text{m}]$$

Wskazanie początkowe ustawiono na 4 prążki interferencyjne /2 - jasne, 2 - ciemne/ przy normalnym kącie padania.

Wyniki badań wierności wskazań zestawionego stanowiska badawczego przedstawiono w tabelicy 2.

$$s = \frac{1}{3} \sqrt{0,1024} = 0,11 \quad [\mu\text{m}]$$

Wartość tabelaryczna statystyki t-Studenta na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ oraz $f = 9$ wynosi [81]:

$$t_{\alpha, f} = t_{0,05; 9} = 2,262$$

natomiast na poziomie istotności $\alpha = 0,02$ oraz $f = 9$ wynosi [81]:

$$t_{\alpha, f} = t_{0,02; 9} = 2,821$$

TABLICA 2. Wyniki badań wierności wskazań zestawionego stanowiska badawczego

$\lambda/4 = 0,1582 [\mu\text{m}]$

Lp	Z _i [prążki]	Δh_i [μm]	$\Delta h_i - \Delta \bar{h}$ [μm]	$(\Delta h_i - \Delta \bar{h})^2$ [μm^2]
1	4	0,63	0	0
2	5	0,79	+0,16	0,0256
3	4	0,63	0	0
4	4	0,63	0	0
5	3	0,47	-0,16	0,0256
6	4	0,63	0	0
7	5	0,79	+0,16	0,0256
8	3	0,47	-0,16	0,0256
9	4	0,63	0	0
10	4	0,63	0	0
$\sum_{i=1}^{10}$	40	6,3		0,1024
	\bar{Z}	$\Delta \bar{h}$		
	4,0	0,63		

Oznacza to, że błędy graniczne wierności wskazań zestawionego stanowiska wynoszą odpowiednio:

$$e_{st} \Big|_{\alpha = 0,05} = \pm 2,262 \cdot 0,11 = \pm 0,25 [\mu\text{m}]$$

$$e_{st} \Big|_{\alpha = 0,02} = \pm 2,821 \cdot 0,11 = \pm 0,31 [\mu\text{m}]$$

Wynika z tego, że:

- 1/ Z prawdopodobieństwem 95 % nie będą przekroczone w serii pomiarów błędy graniczne wierności zestawionego stanowiska do badań wynoszące:

$$e_{st} = \pm 0,25 [\mu\text{m}]$$

- 2/ Z prawdopodobieństwem 98 % nie będą przekroczone w serii pomiarów błędy graniczne wierności zestawionego stanowiska do badań wynoszące:

$$e_{st} = \pm 0,31 [\mu\text{m}]$$

Zakres rozrzutu wskazań zestawionego stanowiska, zgodnie z PN-71/M-02050, wynosi:

$$W_{st} = \Delta h_{i_{\max}} - \Delta h_{i_{\min}} = 0,79 - 0,47 = 0,32 [\mu\text{m}]$$

$$W_{st} = 0,32 [\mu\text{m}]$$

2.1.2. Ustalanie hologramów

Niewłaściwe ustalenie hologramu po przeprowadzonej obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej, obarcza zestawione stanowisko badawcze błędami systematycznymi w postaci dodatkowych prążków interferencyjnych. Problem ten w holografii jest rozwiązywany dwoma sposobami:

- 1/ Obróbkę fotochemiczną płyty fotograficznej przeprowadza się bezpośrednio na stanowisku badawczym /w miejscu/ nie zmieniając jej położenia.
- 2/ Obróbkę fotochemiczną płyty fotograficznej przeprowadza się poza stanowiskiem badawczym. W tym celu stosuje się specjalne przyrządy, które pozwalają na dokładne ustawienie hologramu w miejscu, w którym znajdowała się w czasie procesu rejestracji płyta fotograficzna.

Po dokładnej analizie tych dwóch sposobów stwierdzono, że:

Sposób pierwszy jest dokładny, gdyż nie wymaga zmiany położenia płyty fotograficznej, ale jest niezbyt wygodny w

stosowaniu, ponieważ urządzenie musi być tak skonstruowane aby umożliwiło realizację obróbki fotochemicznej płyty fotograficznej w miejscu. Ponadto kurczenie się emulsji fotograficznej powoduje pojawienie się prążków interferencyjnych - szczególnie na hologramach dużych rozmiarów. W celu usunięcia tych prążków niezbędna jest dodatkowa regulacja. Można też stosować specjalne kasety na płyty fotograficzne, które są zanurzone w cieczy celem przeciwdziałania płynięciu emulsji w czasie obróbki fotochemicznej; rozwiązanie takie zaproponowała np. firma Jadron, są to jednak urządzenia kosztowne i niezbyt wygodne w użyciu.

Sposób drugi, w którym stosuje się specjalne przyrządy, zapewnia po przeprowadzonej obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej poprawne ustawienie hologramu z możliwością dokładnej jego regulacji w przypadku pojawienia się prążków interferencyjnych. Stosowane do tego celu przyrządy posiadają jednak ograniczone możliwości stosowania /małe hologramy, co w przypadku określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn wprowadza poważne ograniczenia wielkości badanych powierzchni/. Ponadto są to przyrządy dosyć skomplikowane i niezbyt wygodne w użyciu.

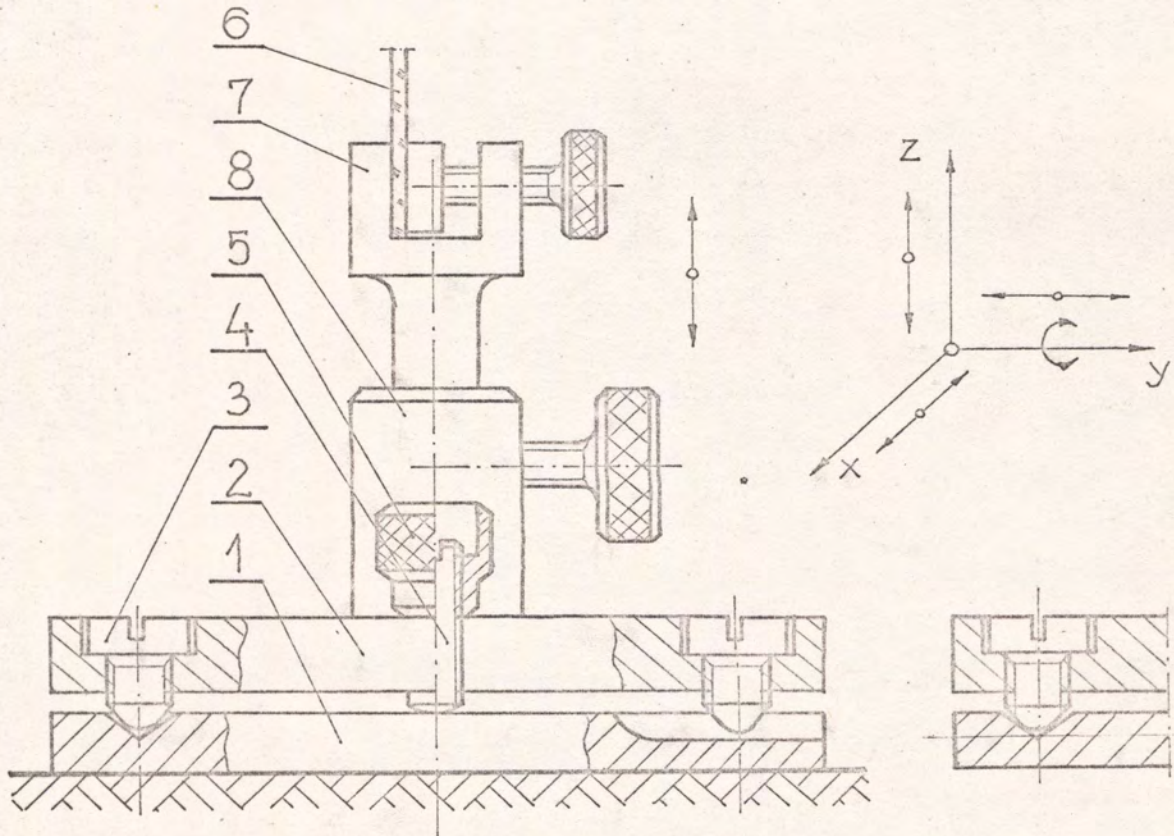
W celu rozwiązania tego problemu zaproponowano specjalną konstrukcję przyrządu do ustalania hologramów. Przyjęto przy tym następujące założenia wstępne, które konstrukcja ta powinna zapewniać:

- 1/ Możliwość mocowania płyt fotograficznych dowolnych rozmiarów.
- 2/ Możliwość realizacji dokładnych przemieszczeń w celu prawidłowego ustawienia hologramu, po obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej w przypadku pojawienia się prążków interferencyjnych, czyli możliwość ustawienia hologramu na prążek zerowy.
- 3/ Kasowanie luzów pomiędzy wszystkimi współpracującymi ze sobą częściami.

Ponadto konstrukcja powinna się charakteryzować:

- prostotą i zwartością budowy,
- łatwością obsługi,
- estetyką wykonania.

Do realizacji dokładnych przemieszczeń liniowych względem wszystkich osi układów współrzędnych w zaproponowanej konstrukcji służą dwa stoliki poziome oraz stolik pionowy, które wchodzi w skład wyposażenia zestawów holograficznych ZHL i ZHB. Schemat przyrządu do ustalania hologramów jest przedstawiony na rys. 19.



Rys. 19. Schemat przyrządu do ustalania hologramów

Opis:

Przyrząd ustalający hologramy zbudowany jest z płyty dolnej 1, która przymocowana jest na stoliku poziomym ZHL-RP lub pionowym. W płycie tej znajduje się gniazdo stożkowe oraz pryzmatyczny rowek, wykonany w ten sposób aby gniazdo stożkowe znajdowało się na prostej, która jest przedłużeniem pryzmatycznego rowka. W płycie górnej 2 znajdują się dwie śruby 3, osadzone na stałe oraz śruba 4, która służy do realizacji dokładnych przemieszczeń kątowych. Nakrętka 5 służy do kasowania luzów. Płyta 2 bazuje śrubami 3 na gnieździe stożkowym oraz rowku pryzmatycznym płyty 1. Śruba 4 bazuje bezpośrednio na powierzchni płaskiej płyty 1. Taki sposób bazowania zapewnia bardzo dokładne ustawienie płyty 2 po przeprowadzonej obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej 6, zamocowanej w łapie 7, która połączona jest przez tulejkę 8 z płytą 2. W przypadku pojawienia się prążków interferencyjnych po wstawieniu płyty górnej 2 wraz z hologramem, w zajmowane poprzednio miejsce, prążki te można usunąć przez regulację kątową za pomocą śruby 4 oraz przez przesuw całego przyrządu, ustawionego na dwóch stolikach poziomych ZHL-RP oraz jednym stoliku do realizacji przemieszczeń pionowych /rys. 19/.

Prototyp opisanego wyżej przyrządu został wykonany w Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Krakowskiej. Jego widok ogólny jest pokazany na rys. 20.

W ramach badań wstępnych określono jakościowo [28] poprawność działania oraz wykonania przyrządu do ustalania hologramów zgodnie z założeniami wstępnymi. Badania te wykazały, że jest możliwe po przeprowadzonej obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej poprawne ustawienie płyty górnej przyrządu wraz z hologramem dokładnie w to samo miejsce, w którym znajdowała się płyta fotograficzna w czasie procesu rejestracji tak, aby prążki interferencyjne się nie pojawiły. Pojawienie się prążków może być spowodowane:

- a/ kurczeniem się emulsji fotograficznej,
- b/ obecnością zanieczyszczeń pomiędzy stykającymi się elementami,
- c/ przemieszczeniem płyty fotograficznej wskutek niestarannego przeprowadzenia obróbki fotochemicznej,
- d/ pozostałością naprężeń resztkowych w płycie fotograficznej pod wpływem siły modyfikującej lub innymi w naturalny sposób nieuchwytnymi czynnikami, np. temperatura itp. czynnikami.

Prążki te można usunąć przez dodatkowe dokładne liniowe lub kątowe przemieszczenie hologramu.



Rys. 20. Widok przyrządu do ustalania hologramów

2.1.3. Wnioski

Badania wstępne w pełni potwierdziły przyjętą pierwszą hipotezę. Wyznaczone błędy graniczne wierności zestawionego stanowiska do badań wynosiły odpowiednio

$$e_{st} = \pm 0,25 \text{ } [\mu\text{m}] \quad \text{dla } \alpha = 0,05$$

$$e_{st} = \pm 0,31 \text{ } [\mu\text{m}] \quad \text{dla } \alpha = 0,02$$

Gdyby błędy te wynosiły:

± 1 prążek interferencyjny tzn.

$$\pm \frac{\lambda}{2} = \pm 0,3164 \text{ } [\mu\text{m}]$$

oznaczałoby to, że w tym zakresie mógłby pojawić się jeden prążek interferencyjny. Ponieważ błędy te są mniejsze

$$e_{st} = \pm 0,25 \text{ lub } \pm 0,31 < \pm 1 \text{ prążek} = \pm 0,32 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wynika z tego, że wpływ błędów przypadkowych, jakimi obarczone było zestawione stanowisko do badań nie powoduje pojawienia się prążków interferencyjnych.

Wyniki badań przyrządu do poprawnego ustalania hologramów po przeprowadzonej obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej wykazały, że jest możliwe ustalenie hologramów na prążek zerowy. Wynika stąd, że wpływ błędów systematycznych spowodowanych niepoprawnym ustaleniem hologramów można pominąć.

2.2. Laboratoryjny model interferometru holograficznego

Pozytywne wyniki badań wstępnych, które potwierdziły hipotezę o adekwatności holograficznej metody interferometrycznej określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, upoważniają nas do podjęcia badań podstawowych + rozpoznawczych i właściwych. Wiąże się to z koniecznością opracowania laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, na bazie produkowanych w PZO zestawów holograficznych - ZHL i ZHB oraz dodatkowego niezbędnego wyposażenia, nie znajdującego się na wyposażeniu zestawów holograficznych z uwagi na specyfikę zagadnienia.

2.2.1. Schemat układu optycznego interferometru

Założenia wstępne, które interferometr powinien zapewniać:

- 1/ Interferometr ma być zbudowany na bazie produkowanych w PZO zestawów holograficznych,
- 2/ Możliwość ustawiania kątów padania od $0 - 80^{\circ}$,
- 3/ Możliwość łatwego kompensowania różnicy dróg optycznych pomiędzy interferującymi wiązkami,
- 4/ Możliwość łatwego dostępu do badanych powierzchni,
- 5/ Wygoda w obserwacji, czytaniu interferogramów,
- 6/ Łatwy, wygodny dostęp do hologramów oraz do wszystkich podzespołów interferometru,
- 7/ Charakteryzować się zwartością i prostotą budowy.

Zaproponowano dwa schematy układów optycznych interferometrów holograficznych, z których po dokładnej analizie w aspekcie realizacji założeń wstępnych wybrano wariant II

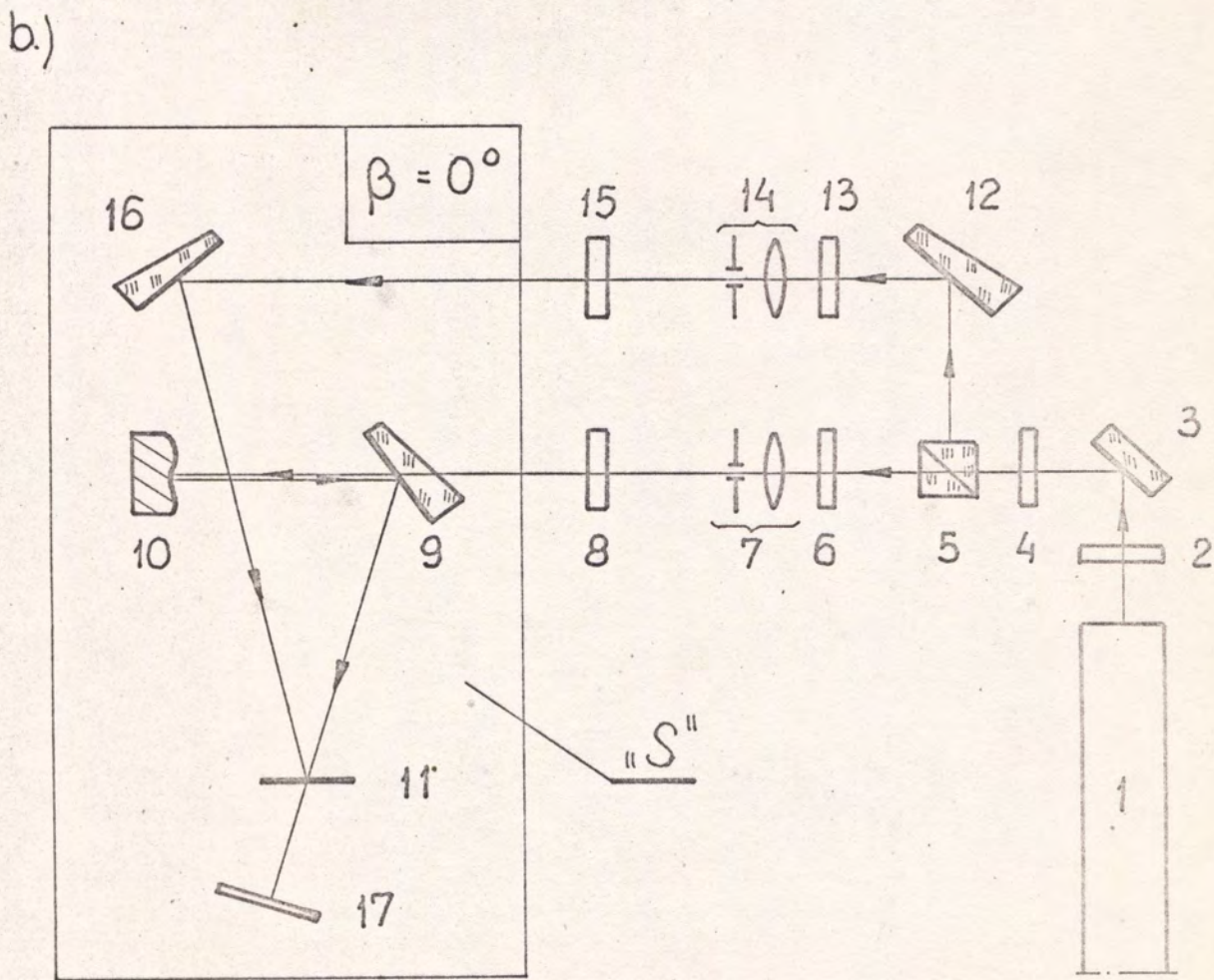
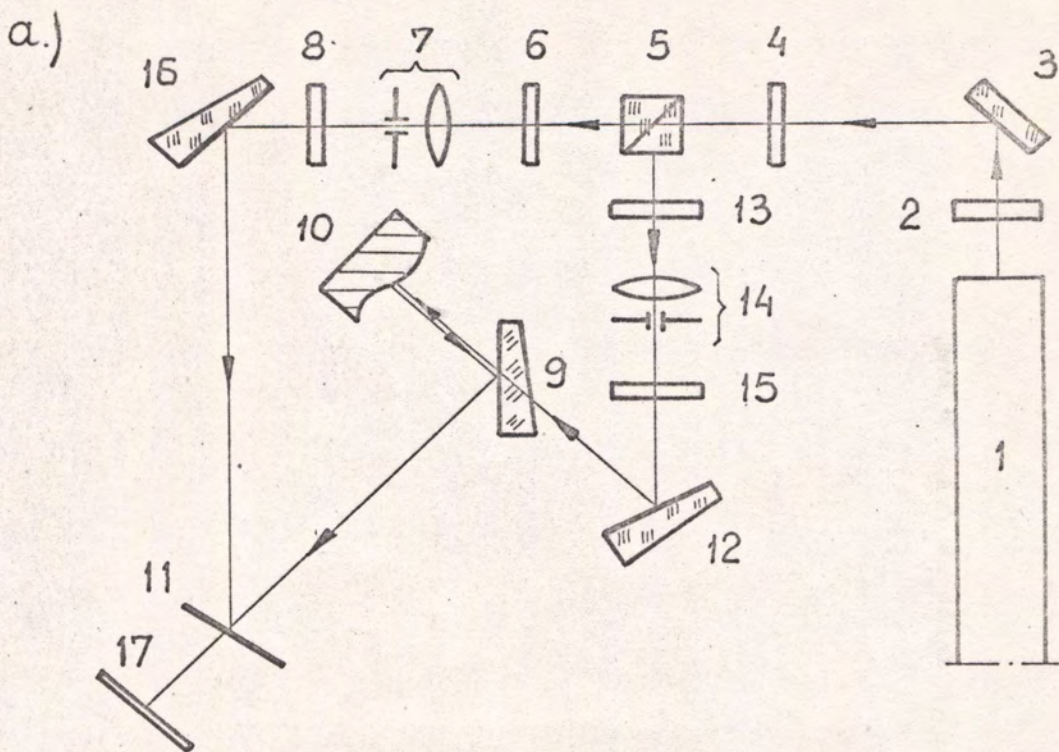
/rys. 21 b/. Oznacza to, że laboratoryjny model interferometru holograficznego zbudowany będzie wg schematu układu optycznego /rys. 21 b/.

Uzasadnienie wyboru wariantu II

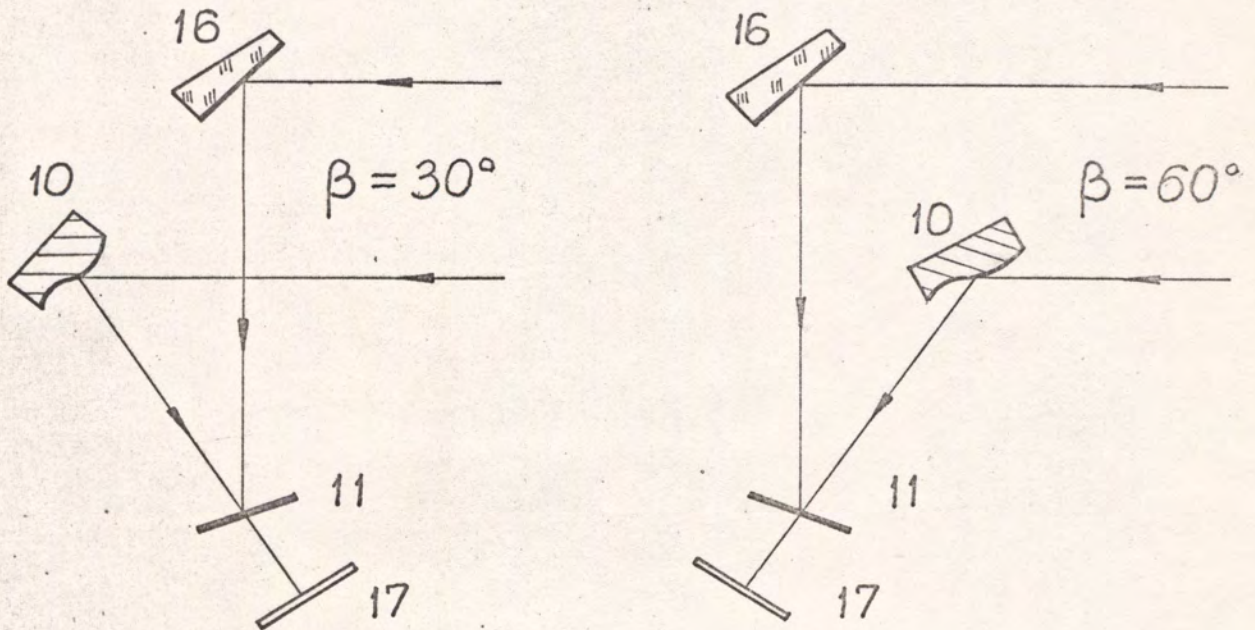
Wariant II charakteryzuje się zwartością i prostotą budowy, posiada lepszą możliwość dostępu do badanych powierzchni oraz pozostałych podzespołów układu, możliwość ustawiania kątów padania od $0 + 90^{\circ}$, jak również wyrównywania dróg optycznych wiązki przedmiotowej i odniesienia.

Opis schematu układu optycznego interferometru /rys. 21 b/

Wiązka światła z lasera 1 jest kierowana przez kierowacz wiązki 3, półfalówkę 4 na kostkę światko-dzielącą 5. Wiązka światła przepuszczona przez kostkę światkodzielącą 5 przez półfalówkę 6, obiektyw - pinhol 7 oraz diafragmę 8 po odpowiednim uformowaniu i oczyszczeniu jest kierowana na badaną powierzchnię 10, od której zostaje kierowana bezpośrednio lub pośrednio przez zwierciadko częściowo przepuszczalne $T = 50\%$ 9, na płytę fotograficzną lub hologram 11. Wiązka odbita od kostki światkodzielącej przez zwierciadko 12, półfalówkę 13, obiektyw-pinhol 14, diafragmę 15 oraz zwierciadko 16 po odpowiednim uformowaniu jest kierowana bezpośrednio na płytę fotograficzną lub hologram. Obserwację topografii błędów kształtu badanej powierzchni 10 przeprowadza się na matówce lub ekranie 12.



Szczegóły "S"



Rys. 21. Schemat układu optycznego interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn

a/ wariant I

b/ wariant II

1 - laser, 2 - migawka, 3 - kierowacz wiązki,
4,6,13 - półfalówki, 5 - kostka światłodzieląca,
7,14 - obiektyw-pinhol, 8,15 - diafragmy, 9 - lu-
stro, $T = 50\%$, 10 - badana powierzchnia, 11 - pły-
ta fotograficzna lub hologram, 12,16 - lustra $T =$
 $= 100\%$, 17 - matówka lub ekran.

2.2.2. Montaż interferometru

Wykaz podzespołów ZHL i ZHB potrzebnych do zmontowania interferometru holograficznego wg schematu rys. 21 b/ przedstawiona w tablicy 3. Wykaz dodatkowego wyposażenia potrzebnego do zmontowania interferometru wg schematu rys. 21 b/ przedstawiono w tablicy 4. Ze schematu układu optycznego rys. 21 b/ można wyróżnić trzy podstawowe zespoły, z których składa się interferometer:

1. Zespół służący do formowania wiązki przedmiotowej
4,5,6,7,8,9,10
2. Zespół służący do formowania wiązki odniesienia
4,5,12,13,14,15,16.
3. Zespół służący do ustalania płyt fotograficznych
albo hologramów 11;

ponadto należy wyróżnić:

- zespół doprowadzający wiązkę światła lasera do kostki światłodzielącej 1,2,3,
- zespół służący do obserwacji interferogramów 11,17.

Montaż podstawowych zespołów laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego przedstawiono na schemacie ideowym montażu rys. 22.

Pomimo, że rozmieszczenie poszczególnych podzespołów interferometru holograficznego w czasie montażu charakteryzuje pewna dowolność rys. 21 b/, to jednak należy spełniać następujące warunki:

- różnica dróg optycznych interferujących wiązek określona przez podzespoły: 5-6-7-8-10-9-11 oraz odpowiednio: 5-12-13-14-15-16-11 powinna być jak najmniejsza,
- odległość pomiędzy podzespołami: 7-10 powinna być jak największa /min. 80 [cm] /,

TABLICA 3. Wykaz podzespołu laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego

Lp	Nazwa podzespołu	Symbol katalogowy	Nr katalogowy	Ilość szt
1	Płyta traserska	MLFc-1600	70301175	1
2	Łoże 800	ZHL-Zu1	70300722	2
3	Łoże 200	ZHL-Zu1/4	70300701	4
4	Sanki szerokie	ZHL-SN	70300702	7
5	Sanki wąskie	ZHL-SW	70300703	7
6	Statyw S1	ZHL-S1	70300704	7
7	Statyw S4	ZHL-S4	70300706	1
8	Kłoczek dystansowy	ZHL-KD	70301015	12
9	Uchwyt okularu i obiektyw	ZHL-UO	70300709	2
10	Uchwyt lustro	ZHL-UL	70300710	3
11	Kierowacz wiązki	ZHL-KW	70300711	1
12	Stolik poziomy	ZHL-RP	70300712	4
13	Podnośnik	ZHL-RV	70300713	2
14	Uchwyt stały	ZHL-US	70300714	7
15	Diafragma w oprawie	ZHL-OD	70310716	2
16	Półfalówka w oprawie	ZHB-OP	70310706	3

TABLICA 4. Wykaz dodatkowego wyposażenia laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego

Lp	Nazwa podzespołu	Ilość szt
1	Przyrząd ustalający próbki	1
2	Przyrząd ustalający hologram	1
3	Laser He-Ne	1
4	Kostka światłodziela w oprawie	1
5	Stolik pionowy	1
6	Migawka	1

- ustawienie podzespołu 10 powinno zapewnić odpowiedni kąt padania wiązki światła na badaną powierzchnię-
- ustawienie podzespołu 16 powinno zapewnić odpowiedni kąt pomiędzy interferującymi wiązkami /przedmiotową i odniesienia/.

a.)

INTERFEROMETR HOLOGRAFICZNY DO OKREŚLANIA TOPOGRAFII BŁĘDŃ KSZTAŁTU
POWIERZCHNI CZĘŚCI MASZYN

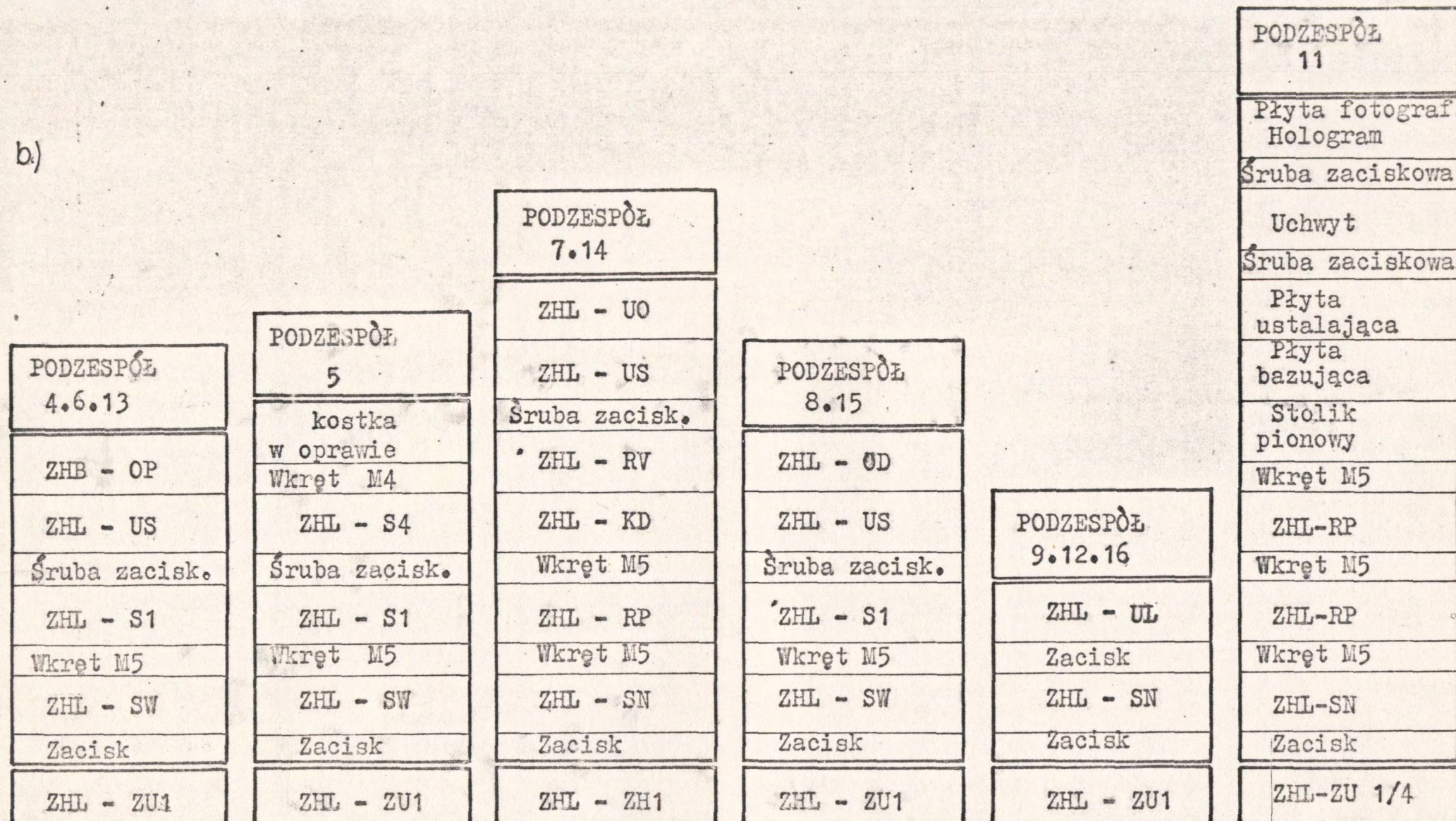
ZESPÓŁ FORMUJĄCY WIĄZKĘ PRZEDMIOTOWĄ						ZESPÓŁ DO USTALANIA PRÓBEK	ZESPÓŁ DO USTALANIA HOLOGRAMU	ZESPÓŁ FORMUJĄCY WIĄZKĘ ODNIESIENIA				
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Podzespół Półfalówka - 1	Podzespół Kostka światłozodcz.	Podzespół Półfalówka - 2	Podzespół Obiektyw-pinhole-1	Podzespół Diafragma - 1	Podzespół Lustro $\Gamma = 50\%$	PRZYRZĄD do ustalania próbek	Przyrząd do usta- lania hologramów	Podzespół Lustro $\Gamma = 100\%$	Podzespół Półfalówka - 3	Podzespół Obiektyw-pinhole-2	Podzespół Diafragma - 2	Podzespół Lustro $\Gamma = 100\%$
ŁOŻE - 800			ZHL - ZU1				ŁOŻE-200 ZHL-ZU1/4	ŁOŻE - 800		ZHL - ZU1		

P E Y T A

T R A S E R S K A

MLFc-1600

b)



Rys. 22. Schemat ideowy montażu: a/ zespołów, b/ podzespołów, laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn

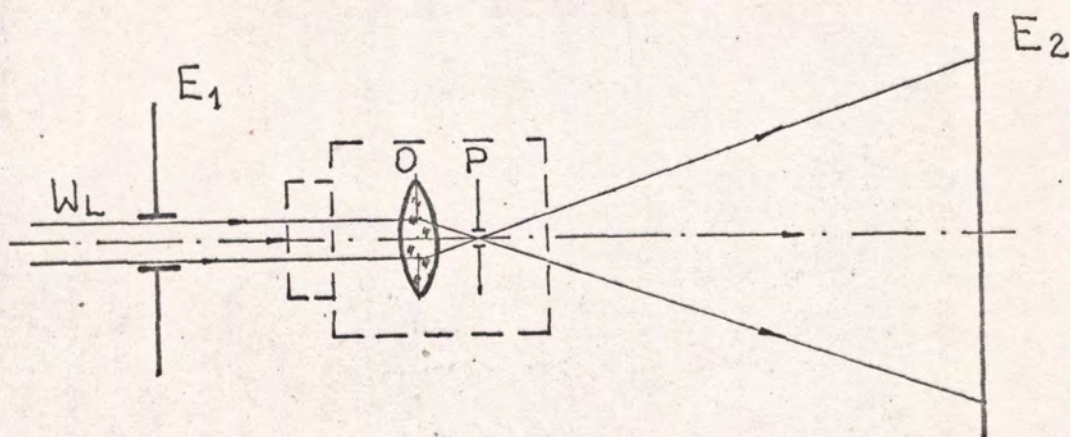
2.2.3. Justowanie interferometru

Przed przystąpieniem do justowania interferometru należy pokręcić z układu podzespoły 7 i 14 rys. 21 b/. W pierwszej kolejności należy jednocześnie dokładnie wypoziomować oraz ustawić na określonej wysokości od powierzchni płyty traserskiej wiązkę światła lasera 1. Wysokość wiązki określa środek badanej próbki 10, po zamocowaniu jej w przyrządzie. Środek kostki światłodzielącej 5, przez którą przepuszczamy wiązkę światła z lasera 1, wyznaczamy na wysokości środka próbki 10. Wstępne ustawienie wysokości poziomu, wiązki przepuszczonej przez kostkę 5 odbywa się przez obrót oraz przesuw górnego lustra po wsporniku kierowacza wiązki 3 aż do uzyskania na początku płyty traserskiej, idąc od kierowacza, wysokości odpowiadającej wysokości wiązki do środka próbki 10. Próbka wraz z przyrządem powinna znajdować się ok. 100 [cm] od początku płyty. Pomiar wysokości wiązki światła najlepiej przeprowadzić przymiarem. Czynność tę powtarzamy kilkakrotnie, aż do wyrównania się wysokości wiązki. Wiązka odbita od kostki światłodzielącej 5 i zwierciadła 12 powinna posiadać taką samą wysokość jak wiązka przechodząca. W innym przypadku należy przez obrót zwierciadła 12, lub kostki 6 względem osi poziomej doprowadzić do wyrównania wysokości z wiązką przechodzącą. Aby łoża, na których znajdują się poszczególne podzespoły układu były równoległe względem wiązek, jak również w celu dokładnego wypoziomowania wiązek wygodnie jest posługiwać się diafragmą 8, 15 z małym otworkiem, zamocowaną na sankach wąskich tak, aby można było ją swobodnie przesuwać po łożu. Wiązka dokładnie ustawiona w poziomie i w pionie powinna przechodzić przez diafragmę ustawioną w każdym miejscu łoża. Jeżeli są odchylenia od pionu dla wiązki przechodzącej przez kostkę 5, należy nieznacznie obrócić lustro kierowacza 3, natomiast jeżeli są odchylenia w poziomie, należy lekko skrócić łoża. Podobne czynności przeprowadzamy dla wiązki odbi-

tej od kostki 5, z tą różnicą, że w przypadku odstępstwa od pionu należy nieznacznie obrócić lustro 12 względem osi poziomej. Czynności te powtarzamy tak długo, aż wiązki będą przechodziły przez diafragmę 8,15 w każdym miejscu łoża. Następnie w miejsce, w którym ma znajdować się płyta fotograficzna 11 wstawiamy ekran i zaznaczamy na nim od powierzchni płyty traserskiej, wysokość odpowiadającą wysokości obu gałęzi wiązek światła. Następnie wiązkę skierowaną do środka powierzchni próbki kierujemy w przypadku normalnego kąta padania przez zwierciadko 9 lub dla innego kąta padania po uprzednim odmierzeniu go bezpośrednio na ekran umieszczony w miejscu 11. Jeżeli wiązka pada poniżej względnie powyżej odmierzonego punktu na ekranie, należy przez obrót zwierciadka 9 lub próbki 10 doprowadzić wiązkę do właściwego położenia. Natomiast przez obrót zwierciadka 15, po uprzednim odmierzeniu określonego kąta pomiędzy wiązkami, należy doprowadzić wiązkę odniesienia do pokrycia się z wiązką przedmiotową na ekranie umieszczonym w miejscu 11. Następnie należy przystąpić do justowania zespołów 7,14 po ich osadzeniu na łożach.

Justowanie zespołów obiektyw-pinhole

Zespoły obiektyw-pinhole 7,13 rys. 21 b/ należy wstawić w układzie optycznym interferometru tak aby ich osie optyczne pokrywały się z osiami wyznaczonymi przez przechodzące przez nie wiązki światła laserowego. W tym celu najlepiej jest przed zespołem obiektyw-pinhole ustawić biały ekran z otworem, przez który przechodzi wiązka światła rys. 23. Za pomocą głowicy mikrometrycznej stolika poziomego ZHL-RP, mechanizmu podnoszenia podnośnika ZHL-RV oraz śruby do dokładnego ustwierania uchwytu stałego ZHL-US, ustawiamy zespół obiektyw-pinhole tak aby odbicie wiązki światła od obiektywu skierowane było centralnie na otwór z ekranem. Następnie należy przystąpić do wzajemnego ustawienia obie-



Rys. 23. Zasada justowania zespołu obiektyw-pinhola

- W_L - wiązka światła z lasera
- E_1 - biały ekran z otworem
- E_2 - biały ekran
- O - obiektyw
- P - pinhol

ktywu i pinhola. W tym celu obiektyw należy odsunąć od pinhola przy pomocy śruby ruchu podłużnego obiektywu, a pinhol za pomocą śrub ustawić tak aby wiązka wychodząca z pinhola obserwowana bezpośrednio wzrokiem była najsilniejsza. Następnie przez stopniowe wkręcanie obiektywu, zbliżamy go do pinhola z jednoczesnym poprawianiem położenia pinhola przy pomocy śrub. Obserwowana wiązka światła na ekranie E_2 rys. 23 powinna być coraz mocniejsza, a liczba pierścieni interferencyjnych centralnie ułożonych wokół wiązki laserowej powinna się zmniejszać. Justowanie należy zakończyć gdy wiązka laserowa padająca na ekran posiada największe natężenie i minimalną ilość pierścieni interferencyjnych. Po zjustowaniu obydwu zespołów obiektyw-pinhola należy skorygować ich położenie za pomocą głowicy mikrometrycznej stolika ZHL-RP oraz mechanizmu podnoszenia podnośnika ZHL-RV, tak aby zamocowany w miejscu płyty fotograficznej ekran był centralnie i równomiernie oświetlony każdą z wiązek światła.

Wyrównywanie natężeń oraz polaryzacja interferujących wiązek

Aby otrzymać hologram o największej kontrastowości [9] w przypadku rejestracji lustrzanej powierzchni wzorcowej wiązki powinny posiadać jednakowe natężenie promieniowania i ten sam kierunek polaryzacji, normalny do płaszczyzny wyznaczonej przez osie interferujących wiązek /przedmiotowej i odniesienia/. Do wyrównywania natężeń oraz polaryzacji służą półfalówki 4, 6, 13 rys. 21 b/. Wyrównywanie natężeń promieniowania przeprowadza się za pomocą dwóch ekranów zamocowanych na statywach pomocniczych, którymi zasłaniamy lewą połowę jednej i prawą połowę drugiej wiązki, tak aby oświetlały one ekran umieszczony w miejscu płyty fotograficznej nie zachodząc na siebie. Następnie obracamy półfalówką 4 tak długo, aż jasność oświetlonych połówek ekranu będzie jednakowa.

Wyrównywanie polaryzacji światła przeprowadza się w następujący sposób. Przed kierowaczem wiązki 3 rys. 21 b/ ustawiamy polaryzator w takim położeniu aby wygasił wiązkę światła za polaryzatorem. Następnie polaryzator tak ustawiony wstawiamy w miejsce diafragmy 8, zasłaniając wiązkę odniesienia, obracając półfalówką 6 doprowadzamy do wygaszenia wiązki na ekranie. W tym celu polaryzator wstawiamy w miejsce diafragmy 15, zasłaniając wiązkę drugą, obracając półfalówką 13 doprowadzamy do wygaszenia wiązki na ekranie. Wynika z tego, że obie wiązki posiadają ten sam kierunek polaryzacji, normalny do płaszczyzny wyznaczonej przez osie interferujących wiązek /w rozpatrywanym przypadku jest on zgodny z kierunkiem polaryzacji wiązki laserowej/.

2.2.4. Naświetlanie i obróbka hologramów

Od właściwego naświetlenia płyty fotograficznej oraz właściwie przeprowadzonej obróbki fotochemicznej płyty fotograficznej w dużym stopniu zależy jakość hologramu.

Czas ekspozycji zależy od gęstości mocy promieniowania światła oraz od czułości płyty fotograficznej. Czas ten należy dobierać eksperymentalnie kierując się osiągnięciem maksymalnej wydajności dyfrakcyjnej hologramu. Ponadto firmy produkujące materiały fotograficzne do holografii podają dla danego typu materiałów wartości ekspozycji, np. Firma AGFA-GEVAERT dla materiałów typu:

- 10 E 75 - ekspozycja 20 [ergów/cm²]
- 8 E 75 - ekspozycja 75 [ergów/cm²]

Obróbkę fotochemiczną naświetlonych płyt fotograficznych można przeprowadzić wg różnych receptur podawanych przez firmy produkujące materiały fotograficzne do holografii. Obecnie najlepszymi i dostępnymi materiałami do holografii są materiały firmy AGFA-GEVAERT. Procedura obróbki fotochemicznej naświetlonych płyt 10E75 oraz 8E75 zalecana przez tą firmę jest następująca:

A. Amplitudowe hologramy

1. Wywoływać 4-5 [min] w wywoływaczu G3p lub G280 w temp. 280° C
2. Płukać 2 [min] w wodzie bieżącej
3. Utrwalać 4 [min] w utrwalaczu G 321
4. Płukać 5 [min] w wodzie bieżącej
5. Płukać w alkoholu etylowym i suszyć

B. Fazowe hologramy

1. Wywoływać 5 [min] w wywołyvaczu G3P w temperaturze 20° C
2. Kąpiel przerywająca 2 [min] w 1 % roztworze kwasu octowego
3. Płukać 5 [min] w wodzie bieżącej
4. Odbiać 2 [min] w roztworze:

- dwuchromian potasu	5 [g]
- skoncentrowany kwas siarkowy	5 [ml]
<hr style="width: 100%;"/>	
uzupełnić destylowaną wodą do	1000 [ml]
5. Płukać 5 min w wodzie bieżącej
6. Kąpiel klarująca 1 min w roztworze

- bezwodny siarczan sodu	50 [g]
- wodorotlenek sodu	1 [g]
<hr style="width: 100%;"/>	
uzupełnić destylowaną wodą do	1000 [ml]
7. Płukać 5 [min] w wodzie bieżącej
8. Kąpiel utrwalająca 10 [min] w roztworze

- alkohol etylowy	88 %
- woda destylowana	10 %
- gliceryna	2 %
- bromek potasu	120 [mg/litr]
- fenosafranina	200 [mg/litr]

Suszyć w obu przypadkach w miejscu bez dostępu zanieczyszczeń w pozycji stojącej, w temperaturze pokojowej przy wilgotności ok. 60 %, w czystym wolnym od kurzu powietrzu.

2.3. Badania podstawowe

W celu określenia dokładności, optymalnych wartości czynników badanych oraz zakresu pomiarowego laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego zostały przeprowadzone badania podstawowe.

2.3.1. Badania dokładności interferometru holograficznego

Dokładność pomiarów na interferometrze holograficznym do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, zależy głównie od dokładności użytego do tego celu interferometru oraz od szeregu nie do uniknięcia warunków wpływowych występujących przy przeprowadzaniu czynności związanych z pomiarem.

Najistotniejszymi warunkami wpływowymi, które należy uwzględniać w trakcie wykonywania pomiarów są [73]:

1. Temperatura 293, 15° K (20° C),
2. Ciśnienie 101324, 72 Pa (760 [mm Hg]),
3. Wilgotność określona ciśnieniem 1333,22 [Pa] (10 [mm Hg]),
4. Zawartość dwutlenku węgla w powietrzu 0,03 %
5. Brak wstrząsów drgań i innych zakłóceń wpływających na wynik pomiaru,
6. Czystość obiektu mierzonego, narzędzia pomiarowego i otoczenia,
7. Stabilność interferometru holograficznego /p.1.1.3/
8. Dokładność przyrządów do ustalania próbek i hologramów na interferometrze holograficznym

Błędy spowodowane niedokładnością pomiarów oraz błędy własne interferometru mają bezpośredni wpływ na wynik pomiaru jak również są bezpośrednią przyczyną błędów pomiaru. Zagadnienie dokładności interferometru przedstawione w p.1.2.

należy rozpatrywać w aspekcie:

- błędów systematycznych
- błędów przypadkowych

Badania będą miały na celu doświadczalne określenie dokładności laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn.

Metodyka i zakres badań doświadczalnych

Z zależności /1.22/ p.1.2. widać, że nominalna ilość prążków interferencyjnych, którą powinien interferometr wskazać na długości ramienia klina L przy bezbłędnym pomiarze, tzn. gdy błąd dokładności interferometru jest równy zero zależy:

$$n_T = F(L, \varphi, \beta)$$

Nominalna ilość prążków interferencyjnych dla określonego kąta klina φ oraz kąta padania β na długości ramienia klina interferencyjnego L , pozwoli nam na wyznaczenie błędu dokładności wskazań interferometru holograficznego tzn. błędu poprawności i błędu wierności wskazań interferometru. Czyli w czasie badań dokładności interferometru należy wyznaczyć:

1. Błąd poprawności interferometru
2. Błąd wierności interferometru

Ponadto z uwagi na pośredni charakter wyznaczenia nominalnej ilości prążków interferencyjnych n_T , przez wyznaczenie φ, β, L wartość ta będzie obarczona błędem pochodzącym od niedokładności pomiaru wielkości φ, β, L /p.1.2./, należy określić na drodze analitycznej z zależności /1.23/

błąd pochodzący od niedokładności pomiaru tych wielkości.

Z przeprowadzonej analizy czynnikowej charakteryzującej dokładność interferometru holograficznego p.1.2. wynika, że na dokładność interferometru mają wpływ przede wszystkim czynniki zakłócające, jak również warunki wpływowe wymienione w niniejszym rozdziale. Ponadto przypuszcza się, że na poprawność interferometru może mieć wpływ kąt padania wiązki przedmiotowej β , dlatego parametr ten przyjęto jako czynnik badany.

Analiza statystyczna wyników badań dokładności pozwoli nam na stwierdzenie czy kąt padania ma istotny wpływ na poprawność interferometru. Podstawą statystycznej oceny istotności jest [10, 54, 81] wynik testu F, opierając się na sprawdzeniu nierówności:

$$F < F_{\alpha, f_2, f_1}$$

gdzie:

F_{α, f_2, f_1} - tabelaryczna wartość /statystyka Scedecora/ określona na poziomie istotności przy f_2 i f_1 stopniach swobody

F - wartość ilorazu wariancji określona na podstawie wyników badań doświadczalnych

Jeżeli nierówność będzie spełniona oznacza to, że test dał wynik nieistotny, tzn. kąt padania nie ma istotnego wpływu na poprawność interferometru.

Do grupy czynników badanych charakteryzujących dokładność interferometru holograficznego zaliczamy kąt padania wiązki przedmiotowej β . Czynnikiem wynikowym jest:

- błąd poprawności interferometru -

Czynniki stałe:

- chropowatość badanej powierzchni,

- wydajność dyfrakcyjna hologramu,

/pozostałe czynniki stałe jak w p. 1.2./

Czynniki zakłócające zostały wymienione w p. 1.2, natomiast warunki wpływowe w p. 2.3.1.

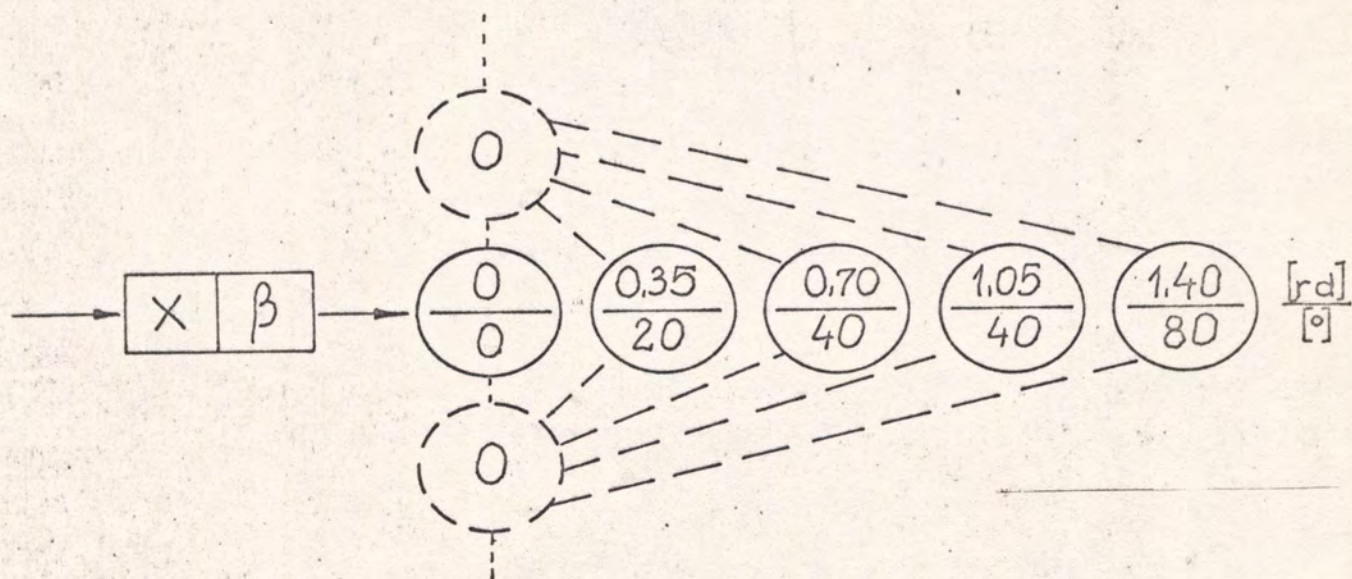
W celu sprawdzenia czy kąt padania β ma istotny wpływ na błąd poprawności interferometru przeprowadzono badania według zmodyfikowanego programu PS/DS-Up /program statyczny zdeterminowany selekcyjny jednoczynnikowy pojedynczy [54] /, tzn. zakładając, że ustalonymi wartościami centralnymi czynników pozostałych /których nie ma/ są wartości zerowe. Oznacza to praktycznie, że mamy do czynienia z jednym czynnikiem badanym, którym jest kąt padania β . Przyjęcie takiego programu oznacza, że mamy określić następującą zależność funkcyjną:

$$\varepsilon = F(\beta)$$

Przyjmujemy następujące wartości badanego czynnika β , tablica 5 /rys. 24/.

TABLICA 5. Wartości badanego czynnika

$x = \beta$	[rd]	0	0,35	0,70	1,05	1,40
	[°]	0	20	40	60	80
Nr kolejny dośw.		3	4	1	5	2



Rys. 24. Schemat realizacji zmodyfikowanego programu PS/DS-Up w badaniach wpływu kąta padania na błąd poprawności interferometru

Łączna ilość pomiarów będzie wynosiła

$$N = r [(1 + k) - i]$$

gdzie:

r - liczba powtórzeń pomiarów / $r \leq 10$ /

k - liczba wartości badanego czynnika / $k \leq 5$ /

i - liczba badanych czynników / $i = 1$ /

czyli

$$N = 10 [(1 + 5) - 1] = 50 \text{ pomiarów}$$

Wyniki badań zostaną poddane statystycznej ocenie istotności za pomocą testu F. W przypadku stwierdzenia istotności na poziomie $\alpha = 0,05$ zostanie określona funkcja błędu poprawności metodą analizy regresji.

Te same wyniki badań pozwolą nam określić błąd wierności-

ci interferometru holograficznego dla poszczególnych wartości badanego czynnika przez wyznaczenie:

1. Średniego błędu kwadratowego wierności wskazań interferometru dla serii kolejnych pomiarów w określonych warunkach użytkowania interferometru wg zależności /1.18/
2. Błędu granicznego wierności interferometru na poziomie istotności $\alpha = 0,02$ oraz $\alpha = 0,05$ wg zależności /1.19/
3. Zakresu rozrzutu wskazań interferometru wg zależności /1.20/

Ostatecznie jako błąd wierności interferometru holograficznego zostanie przyjęta maksymalna wartość:

- średniego błędu kwadratowego wierności wskazań
- błędu granicznego wierności
- zakresu rozrzutu wskazań

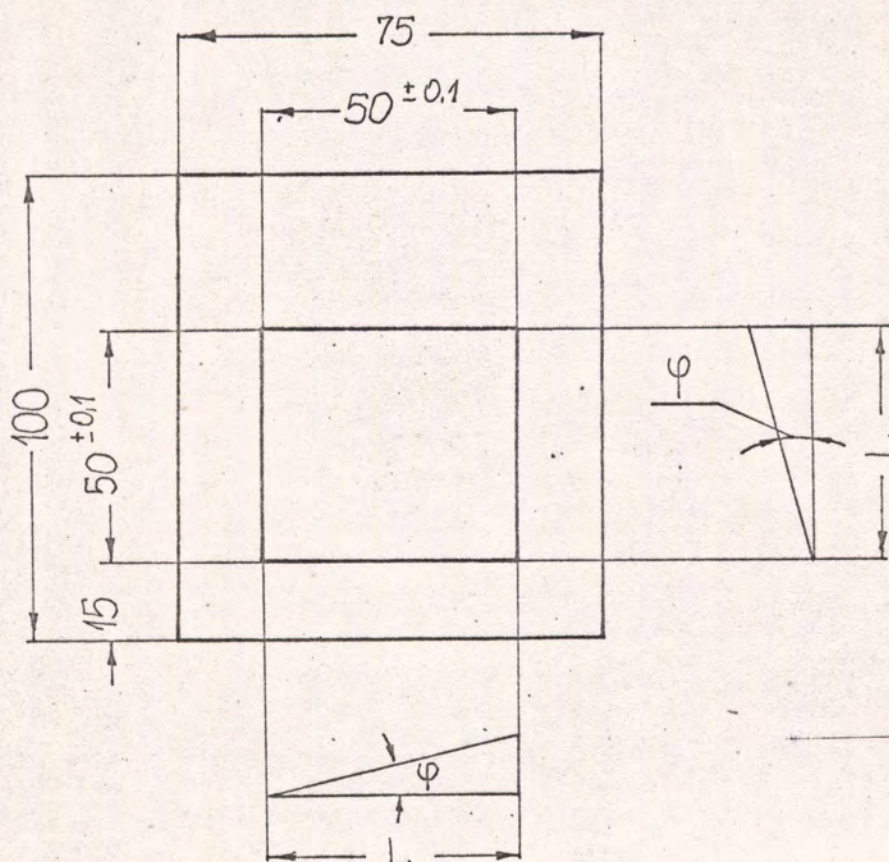
z poszczególnych wartości badanego czynnika - kąta padania β .

Metody pomiarów:

Pomiar wielkości związanych bezpośrednio z realizacją badań dokładności interferometru, w oparciu o zmodyfikowany program PS/DS-Up:

1. Pomiar kąta padania wiązki przedmiotowej β - przeprowadzono przy użyciu specjalnych wzorców kątów wykonanych na podstawie zależności geometrycznych w Centralnym Laboratorium Optyki z dokładnością $\pm 0^{\circ} 15'$
2. Pomiar długości ramienia klina interferencyjnego L - długość ramienia klina interferencyjnego wyznaczono bezpośrednio na powierzchni wzorcowej przy pomocy specjalnego wzorca wykonanego z blachy o grubości $0,5$ [mm] z dokładnością $\pm 0,1$ [mm] wg rys. 25. Wartość nominalną ramienia klina przyjęto $L = 50$ [mm].
3. Pomiar kąta klina - przeprowadzony został za pomocą autocolimatora-WATTS produkcji angielskiej z dokładnością $\pm 0^{\circ} 0' 0,5''$
4. Wyznaczanie błędu poprawności wskazań interferometru ε . Ponieważ błędy te mają charakter błędów systematycznych postępowych p.1.2., proponuje się określić błąd poprawności wskazań interferometru w postaci względnego błędu poprawności wskazań. Wynika z tego również, że jeżeli kąt padania β posiada wpływ istotny na ε , wówczas zostanie określona zależność funkcyjna w postaci względnego błędu poprawności interferometru $\varepsilon = F(\beta)$. Względny błąd poprawności interferometru wyznaczymy wg zależności /1.25/.

Ze względu na pośredni charakter wyznaczenia wartości n_T zostanie obliczony z zależności /1.23/ błąd Δn_T dla wszystkich wartości badanego kąta β .



Rys.25. Wzornik /maska/ do wyznaczania nominalnej wartości ramienia klina interferencyjnego

Wyniki badań dokładności interferometru holograficznego

Kolejność prowadzonych doświadczeń została ustalona na podstawie małej tablicy liczb losowych [83] i podana w tablicy 5.

Z zależności /1.22/ obliczono nominalną ilość interferencyjnych prążków.

Wartości funkcji dla poszczególnych kątów β i φ zestawiono w tablicach 6.7.

TABLICA 6. Wartości funkcji dla kąta padania

$\beta [^\circ]$	0	20	40	60	80
$\sin \beta$	0	0,3420	0,6428	0,8660	0,9848
$\cos \beta$	1	0,9397	0,7660	0,5000	0,1736

TABLICA 7. Wartość funkcji dla kąta klina [82]

$\varphi [^\circ]$	30	32	39	60	60
$\sin \varphi$	0,00015520	0,00015520	0,00018915	0,00029100	0,00029100
$\cos \varphi$	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000

Jak już wcześniej wspomniano badania prowadzono dla wartości $L = 50$ [mm], $\lambda = 0,6328$ [μm]. Wyniki badań zostały przedstawione w tablicach 8,9,10,11,12

$$\epsilon_{ji} = \frac{n_{dji} - n_{jT}}{n_{jT}}$$

gdzie:

ϵ_{ji} - wartość kolejnego względnego błędu poprawności interferometru dla poszczególnych wartości badanego czynnika $j = 1, \dots, 5$, $i = 1, \dots, 10$

n_{dji} - wartość wskazania interferometru

n_{jT} - nominalna ilość prążków interferencyjnych dla Z_{ji} wskazania

TABLICA 8. Wyniki doświadczeń: $\beta = 20^\circ$
 $\varphi = 0^\circ 0' 30''$, $n_{1T} = 46$ [prążków inter.]

$\frac{1}{3}$	n_{d1i} [prążki]	ε_{1i}	$n_{d1i} - \bar{n}_{d1}$ [prążki]	$(n_{d1i} - \bar{n}_{d1})^2$ [prążki ²]
1	46	0	-0,1	0,01
2	46	0	-0,1	0,01
3	46	0	-0,1	0,01
4	45	-0,022	-1,1	1,21
5	46	0	-0,1	0,01
6	47	+0,022	+0,9	0,81
7	46	0	-0,1	0,01
8	47	+0,022	+0,9	0,81
9	46	0	-0,1	0,01
10	46	0	-0,1	0,01
10	461	+0,022		
$i=1$				2,90
\bar{n}_{d1}	46,1	+0,0022		
$\bar{\varepsilon}_1$				

$$\varepsilon_{1i} = \frac{n_{d1i} - n_{1T}}{n_{1T}}$$

TABLICA 9. Wyniki doświadczeń: $\beta = 20^\circ$,
 $\varphi = 0^\circ, 0' 32''$, $n_{2T} = 46$ [prążków inter.]

2 4				
Lp	$n_{d_{2i}}$ [prążki]	ϵ_{2i}	$n_{d_{2i}} - \bar{n}_{d_2}$ [prążki]	$(n_{d_{2i}} - \bar{n}_{d_2})^2$ [prążki ²]
1	46	0	+0,1	0,01
2	45	-0,022	-0,9	0,81
3	46	0	+0,1	0,01
4	46	0	+0,1	0,01
5	45	-0,022	-0,9	0,81
6	46	0	+0,1	0,01
7	46	0	+0,1	0,01
8	47	+0,022	+1,1	1,21
9	46	0	+0,1	0,01
10	46	0	+0,1	0,01
10 i=1	459	-0,022		2,90
\bar{n}_{d_2} $\bar{\epsilon}_2$	45,9	-0,0022		

$$\epsilon_{2i} = \frac{n_{d_{2i}} - n_{2T}}{n_{2T}}$$

TABLICA 10. Wyniki doświadczeń: $\beta = 40^\circ$
 $\varphi = 0^\circ, 0'39''$, $n_{3T} = 46$ [prążków inter.]

$\begin{matrix} 3 \\ 1 \end{matrix}$				
Lp	$n_{d_{3i}}$ [prążki]	ϵ_{3i}	$n_{d_{3i}} - \bar{n}_{d_3}$ [prążki]	$(n_{d_{3i}} - \bar{n}_{d_3})^2$ [prążki ²]
1	46	0	+0,1	0,01
2	46	0	+0,1	0,01
3	46	0	+0,1	0,01
4	46	0	+0,1	0,01
5	46	0	+0,1	0,01
6	45	-0,022	-0,9	0,81
7	46	0	+0,1	0,01
8	46	0	+0,1	0,01
9	46	0	+0,1	0,01
10	46	0	+0,1	0,01
10 i=1	459	-0,022		
\bar{n}_{d_3} $\bar{\epsilon}_3$	45,9	-0,0022		0,90

$$\epsilon_{3i} = \frac{n_{d_{3i}} - n_{3T}}{n_{3T}}$$

TABLICA 11. Wynik doświadczeń: $\beta = 60^\circ$
 $\varphi = 0^\circ 1' 0''$, $n_{4T} = 46$ [prążków inter.]

4 5				
Lp	$n_{d_{4i}}$ [prążki]	ε_{4i}	$n_{d_{4i}} - \bar{n}_{d_4}$ [prążki]	$(n_{d_{4i}} - \bar{n}_{d_4})^2$ [prążki ²]
1	46	0	-0,1	0,01
2	46	0	-0,1	0,01
3	46	0	-0,1	0,01
4	47	+0,022	+0,9	0,81
5	46	0	-0,1	0,01
6	46	0	-0,1	0,01
7	46	0	-0,1	0,01
8	46	0	-0,1	0,01
9	46	0	-0,1	0,01
10	46	0	-0,1	0,01
10 i=1	461	+0,022		0,90
\bar{n}_{d_4} $\bar{\varepsilon}_4$	46,1	+0,0022		

$$\varepsilon_{4i} = \frac{n_{d_{4i}} - n_{4T}}{n_{4T}}$$

TABLICA 12. Wyniki doświadczeń $\beta = 80^\circ$,
 $\varphi = 0^\circ 1' 0''$, $n_{5T} = 16$ [prążków inter.]

$\begin{matrix} 5 \\ 2 \end{matrix}$				
Lp	n_{d5i} [prążki]	ε_{5i}	$n_{d5i} - \bar{n}_{d5}$ [prążki]	$(n_{d5i} - \bar{n}_{d5})^2$ [prążki ²]
1	16	0	0	0
2	16	0	0	0
3	16	0	0	0
4	16	0	0	0
5	16	0	0	0
6	16	0	0	0
7	16	0	0	0
8	16	0	0	0
9	16	0	0	0
10	16	0	0	0
$i=1$	160	0		
\bar{n}_{d5}				0
$\bar{\varepsilon}_5$	16	0		

$$\varepsilon_{5i} = \frac{n_{d5i} - n_{5T}}{n_{5T}}$$

TABLICA 13. Zestawienie wyników badań poprawności interferometru holograficznego

Lp	$X = \beta$	rd	0	0,35	0,70	1,05	1,40
		o	0	20	40	60	80
1	ξ_{ji} $j = 1, \dots, 5; i = 1, \dots, 10$		0 0	0 0	0 0	0	0
2			0	-0,022	0	0	0
3			0	0	0	0	0
4			-0,022	0	0	+0,022	0
5			0	-0,022	0	0	0
6			+0,022	0	-0,022	0	0
7			0	0	0	0	0
8			+0,022	+0,022	0	0	0
9			0	0	0	0	0
10			0	0	0	0	0
	ω_j		+0,0022	-0,0022	-0,0022	+0,0022	0

TABLICA 14. Zestawienie wyników badań wierności interferometru holograficznego /średni błąd kwadratowy wierności wskazań, błędy graniczne wierności, zakres rozrzutu wskazań/

Lp	$X = \beta$	[rd]	0	0,35	0,70	1,05	1,40
		[°]	0	20	40	60	80
1	prążki inter. n_{dji} $j = 1, \dots, 5 ; i = 1, \dots, 10$		46	46	46	46	16
2			46	45	46	46	16
3			46	46	46	46	16
4			45	46	46	47	16
5			46	45	46	46	16
6			47	46	45	46	16
7			46	46	46	46	16
8			47	47	46	46	16
9			46	46	46	46	16
10			46	46	46	46	16
\bar{n}_{d_j}	[prążki inter.]		46,1	45,9	45,9	46,1	16
	[μm]		7,3	7,7	9,5	14,6	14,6
S_j	[prążki inter.]		0,57	0,57	0,32	0,32	0
	[μm]		0,090	0,096	0,066	0,101	0
e_j	$\alpha = 0,02$		$\pm 0,25$	$\pm 0,27$	$\pm 0,19$	$\pm 0,28$	0
	$\alpha = 0,05$		$\pm 0,20$	$\pm 0,22$	$\pm 0,15$	$\pm 0,23$	0
W_j	[prążki inter.]		2	2	1	1	0
	[μm]		0,32	0,34	0,21	0,32	0

Obliczenia prowadzone były wg niżej podanych zależności:

$$S_j = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (n_{dji} - \bar{n}_{dj})^2} \quad [\text{prążki inter.}]$$

$$S_j = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (n_{dji} - \bar{n}_{dj})^2} \cdot \frac{\lambda}{4 \cos \beta} \quad [\mu\text{m}]$$

$$e_j = \pm t_{d,f} \cdot S_j \quad [\text{prążki inter.}] \quad \text{lub.} \quad [\mu\text{m}]$$

$$W = n_{ji \text{ max.}} - n_{ji \text{ min.}} \quad [\text{prążki inter.}]$$

$$W = (n_{ji \text{ max.}} - n_{ji \text{ min.}}) \cdot \frac{\lambda}{4 \cos \beta} \quad [\mu\text{m}]$$

$$t_{d,f} = f_{0,02,9} = 2,821 \quad [81]$$

$$t_{d,f} = f_{0,05,9} = 2,262 \quad [81]$$

Analiza statystyczna wyników badań

Badania zrealizowane wg zmodyfikowanego programu PS/DS-Up miały na celu określenie wpływu kąta padania wiązki przedmiotowej β na błąd poprawności interferometru holograficznego:

Analiza statystyczna wyników badań obejmuje:

- analizę istotności wpływu kąta padania β na błąd poprawności interferometru,
- analizę regresji stanowiącą podstawę do wyznaczenia matematycznego modelu obiektu badań

Ponadto ze względu na pośredni charakter wyznaczenia nominalnej ilości prążków interferencyjnych - n_T , a tym samym ε przez φ , β , L określono z zależności /1.23/ błąd Δn_T dla wszystkich wartości kąta β co pozwoliło nam na dodatkową ocenę wartości n_T jak również ε .

Wyniki badań zestawione w tabelicy 13 posłużyły nam do przeprowadzenia statystycznej oceny istotności wpływu ką-

ta padania na błąd poprawności interferometru za pomocą testu F wg niżej podanego schematu:

1. $Z_{ji}^2 = Z_j^2$

2. $N = \sum_{j=1}^{m_k} r_j \quad m_k = 1, \dots, 5$

3. $(\sum_i Z)_j$ oraz $Z_i = \frac{(\sum_i Z)_j}{r_j}$

4. $(\sum_i Z^2)_j$

5. $\sum_j \sum_i Z = \sum_{j=1}^{m_k} (\sum_i Z)_j$

oraz $\bar{Z} = \frac{\sum_j \bar{Z}_j}{m_k}$

6. $\sum_j \sum_i Z^2 = \sum_{j=1}^{m_k} (\sum_i Z^2)_j$

7. $\Delta Z = \frac{(\sum_j \sum_i Z)^2}{N}$

8. $[(\sum_i Z)_j]^2$

9. $T_j = \frac{[(\sum_i Z)_j]^2}{r_j}$

10. $\sum_i T_j = \sum_{j=1}^{m_k} T_j$

11. $SQ_i = (\sum_j T_j) - \Delta Z$

12. $SQ_c = (\sum_j \sum_i Z^2) - \Delta Z$

13. $SQ_p = SQ_c - SQ_{ip}$

14. $f_2 = m_k - 1$

15. $f_1 = N - k$

16. $S^2_{ip}(z) = \frac{SQ_{ip}}{f_2}$

17. $S^2_p(z) = \frac{SQ_p}{f_1}$

18. $F = \frac{S^2_{ip}(z)}{S^2_p(z)}$

19. Z tablic statystycznych [81] określimy:

$$F_{\alpha, f_2, f_1}$$

20. Oceniamy alternatywę

- jeżeli $F_{\alpha, f_2, f_1} < F$ - istotny wpływ kąta padania β ,
- jeżeli $F_{\alpha, f_2, f_1} > F$ - nieistotny wpływ kąta padania β

Wyniki powyższych obliczeń zestawiono w tabelicy 15.

Analiza istotności wpływu kąta padania β na błąd poprawności interferometru tabl. 15 wykazała, że:

$$F = 0,6 > F_{0,01,4,45} = 3,77 > F_{0,05,4,45} = 2,575 > F_{0,1,4,45} = 2,075$$

Upoważnia to do wniosku, że wpływ kąta padania β na błąd poprawności interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn jest wpływem nieistotnym zarówno na poziomie istotności $\alpha = 0,01$, $\alpha = 0,05$, jak również $\alpha = 0,1$.

TABLICA 15. Statystyczna analiza istotności wpływu kąta padania na błąd poprawności interferometru

A.

Kąt padania $X = \beta$	[rd]	0		0,35		0,70		1,05		1,40		
	[°]	0		20		40		60		80		
$\frac{\epsilon_{ji}}{\epsilon_{ji}^2}$	1.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	-0,022	0,000484	0	0	0	0	0	0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	4	-0,022	0,000484	0	0	0	0	+0,022	0,000484	0	0	
	5	0	0	-0,022	0,000484	0	0	0	0	0	0	
	6	+0,022	0,000484	0	0	-0,022	0,000484	0	0	0	0	
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	8	+0,022	0,000484	+0,022	0,000484	0	0	0	0	0	0	
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$m_k = 5$
r_j	10	—	10	—	10	—	10	—	10	—	$N = 50$	
$(\sum_i \epsilon)_{j_1}$	+0,022		-0,022		-0,022		+0,022		0		$\sum_j \sum_i \epsilon = 0$	
$\bar{\epsilon}_j$	+0,0022		-0,0022		-0,0022		+0,0022		0		$\bar{\epsilon} = 0$	
$(\sum_i \epsilon^2)_{j_1}$	—	0,001452	—	0,001452	—	0,000484	—	0,000484	—	0	$\sum_j \sum_i \epsilon^2 = 0,003872$	
$[(\sum_i \epsilon)_{j_1}]^2$	0,000484	—	0,000484	—	0,000484	—	0,000484	—	0	—	$\Delta \epsilon = 0$	
T_j	0,0000484	—	0,0000484	—	0,0000484	—	0,0000484	—	0	—	$\sum_i T_j = 0,0001936$	

B.

	SQ	f	$s^2(c)$	F	F_{d, f_2, f_1}	Wynik testu	
c	0,0038720	—	—		0,10	2,075	nieistotny
ip	0,0001936	$f_2 = 4$	0,0000484	0,6	0,05	2,575	nieistotny
d	0,0000484	$f_1 = 45$	0,0000818		0,01	3,77	nieistotny

Niezależnie od analizy statystycznej istotności przeprowadzono analizę regresji w celu dodatkowego potwierdzenia nieistotności wpływu kąta padania β na błąd poprawności interferometru ε . Do analizy regresji przyjęto funkcję typu:

$$\varepsilon = b_0 + b_1 \beta$$

W kolejności obliczymy zgodnie z [54] następujące wielkości:

$$\sum \beta^2 - \bar{\beta} \sum \beta = 12000 - 40 \cdot 200 = 4000$$

$$\sum \varepsilon^2 - \bar{\varepsilon} \sum \varepsilon = 0,0003872$$

$$\sum \beta \varepsilon - \bar{\beta} \sum \varepsilon = 0$$

następnie obliczono współczynniki funkcji regresji wg zależności [54]:

$$b_1 = \frac{\sum \beta \varepsilon - \bar{\beta} \sum \varepsilon}{\sum \beta^2 - \bar{\beta} \sum \beta} = 0,000066$$

$$\underline{b_1 = 0,00007}$$

$$b_0 = \bar{\varepsilon} - b_1 \cdot \bar{\beta} = -0,0028$$

$$\underline{b_0 = -0,003}$$

czyli ostatecznie funkcja regresji ma postać:

$$\varepsilon = -0,003 + 0,00007 \beta$$

$$b_0 = -0,003$$

$$b_1 = 0,00007$$

wartość współczynnika $b_1 = 0,00007$, który określa wpływ kąta podania β jest szczególnie mała, co dodatkowo potwierdza i pozostaje w pełnej zgodności z testem F, że wpływ jego jest nieistotny na błąd poprawności interferometru holograficznego.

Ponadto, jeżeli średnia arytmetyczna wskazań interferometru w jednej serii kolejnych pomiarów tej samej wartości

wielkości mierzonej wykonanych w normalnych warunkach użytkowania interferometru, dla określonego kąta klina φ oraz kąta padania β na długości ramienia klina L będzie zawarta zgodnie z /1.24./

$$n_T - \Delta n_T \leq \bar{n} \leq n_T + \Delta n_T$$

to dodatkowo potwierdzi, że błąd poprawności interferometru holograficznego jest pomijalny, co oznacza, że błąd dokładności interferometru /w przypadku pominięcia również błędu poprawności przyrządu do ustalania próbek, co zostało w załączniku do niniejszej pracy uzasadnione/, będzie się równał BŁĘDOWI WIERNOŚCI WSKAZAŃ INTERFEROMETRU HOLOGRAFICZNEGO.

Z zależności /1.23/

$$\Delta n_T = \pm \left(\left| \frac{4 \cos \beta \sin \varphi}{\lambda} \Delta L \right| + \left| - \frac{4L \sin \beta \sin \varphi}{\lambda} \Delta \beta \right| + \left| \frac{4L \cos \beta \cos \varphi}{\lambda} \Delta \varphi \right| \right)$$

dla wcześniej ustalonych dokładności pomiarów poszczególnych wielkości β , φ , L

$$\Delta L = \pm 0,1 \text{ [mm]} = \pm 100 \text{ [\mu m]}$$

$$\Delta \beta = \pm 0^\circ 15' = \pm 0,004363 \text{ [rd]} \quad - \quad [82]$$

$$\Delta \varphi = \pm 0^\circ 0' 0,5'' = \pm 0,0000024 \text{ [rd]} \quad - \quad [82]$$

oraz

$$L = 50 \text{ [mm]} = 50\,000 \text{ [\mu m]}$$

Poszczególne wartości błędów odpowiednio wynoszą:

$$\Delta n_{1T} = \pm 0,85 \text{ [prążka inter.]} = \pm 0,13 \text{ [\mu m]}$$

$$\Delta n_{2T} = \pm 0,88 \text{ [prążka inter.]} = \pm 0,15 \text{ [\mu m]}$$

$$\Delta n_{3T} = \pm 0,84 \text{ [prążka inter.]} = \pm 0,17 \text{ [\mu m]}$$

$$\Delta n_{4T} = \pm 0,82 \text{ [prążka inter.]} = \pm 0,26 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$\Delta n_{5T} = \pm 0,41 \text{ [prążka inter.]} = \pm 0,38 \text{ [}\mu\text{m]}$$

czyli zgodnie z /1.24/ możemy napisać, że:

$$\frac{45,15}{7,1} < \frac{46,1}{7,3} < \frac{46,85}{7,4} \quad \begin{array}{l} \text{[prążki inter.]} \\ \text{[}\mu\text{m]} \end{array}$$

$$\frac{45,12}{7,6} < \frac{45,9}{7,7} < \frac{46,88}{7,9} \quad \begin{array}{l} \text{[prążki inter.]} \\ \text{[}\mu\text{m]} \end{array}$$

$$\frac{45,16}{14,3} < \frac{45,9}{14,6} < \frac{46,84}{14,8} \quad \begin{array}{l} \text{[prążki inter.]} \\ \text{[}\mu\text{m]} \end{array}$$

$$\frac{15,59}{14,2} < \frac{16}{14,6} < \frac{16,41}{15} \quad \begin{array}{l} \text{[prążki inter.]} \\ \text{[}\mu\text{m]} \end{array}$$

co ostatecznie upoważnia do pominięcia błędu poprawności interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn.

Z porównania wyników badań wierności interferometru holograficznego tablica 16 widać, że maksymalny błąd kwadratowy wierności wskazań interferometru wynosi:

$$S = 0,101 \text{ [}\mu\text{m]}$$

oraz odpowiednio maksymalne błędy graniczne wierności interferometru wynoszą:

$$e = \pm 0,28 \text{ [}\mu\text{m]} \quad - \quad \alpha = 0,02$$

$$e = \pm 0,23 \text{ [}\mu\text{m]} \quad - \quad \alpha = 0,05$$

Wynika z tego, że:

1. Z prawdopodobieństwem 98 % nie będą przekroczone w serii pomiarów na interferometrze holograficznym błędy graniczne wierności wynoszące:

$$e = \pm 0,28 \text{ [}\mu\text{m]}$$

2. Z prawdopodobieństwem 95 % nie będą przekroczone w serii pomiarów na interferometrze holograficznym błędy graniczne wierności wynoszące:

$$e = \pm 0,23 [\mu\text{m}]$$

oraz maksymalny zakres rozrzutu wskazań interferometru holograficznego wynosi:

$$W = 0,34 [\mu\text{m}]$$

Z uwagi na wyraźnie pomijalny wpływ błędu poprawności, błędy graniczne dokładności interferometru są równe błędom granicznym wierności interferometru, czyli błędy graniczne dokładności interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn wynoszą:

$$e_d = \pm 0,28 [\mu\text{m}] \quad - \quad \alpha = 0,02$$

$$e_d = \pm 0,23 [\mu\text{m}] \quad - \quad \alpha = 0,05$$

Proponuje się wartości te zaokrąglić, czyli przyjąć ostatecznie:

$$e_d = \pm 0,3 [\mu\text{m}] \quad - \quad \alpha = 0,02$$

$$e_d = \pm 0,2 [\mu\text{m}] \quad - \quad \alpha = 0,05$$

Wynika z tego, że:

1. Z prawdopodobieństwem 98 % rzeczywiste błędy kształtu badanych powierzchni w serii pomiarów na interferometrze holograficznym powinny mieścić się w granicach:

$$\pm 0,3 [\mu\text{m}]$$

2. Z prawdopodobieństwem 95 % rzeczywiste błędy kształtu badanych powierzchni w serii pomiarów na interferometrze holograficznym powinny mieścić się w granicach:

$$\pm 0,2 [\mu\text{m}]$$

Błędy graniczne interferometru holograficznego, które są równe w tym przypadku błędom granicznym wierności interferometru odnoszą się tylko do pomiarów w polu jednorodnym,

gdzie całkowity błąd kształtu jest równy sumie prążków interferencyjnych. Przy pomiarze w polu prążkowym ilość prążków interferencyjnych nie ma wpływu na błąd pomiaru. Błąd ten może być spowodowany jedynie niedokładnością pomiaru wartości odkształcenia i odległości pomiędzy prążkami interferencyjnymi.

TABLICA 16. Zestawienie zbiorcze wyników badań wierności interferometru holograficznego /średni błąd kwadratowy wierności wskazań, błędy graniczne wierności oraz zakres rozrzutu wskazań interferometru/

β	[rd]	0	0,35	0,70	1,05	1,40
	[°]	0	20	40	60	80
s	[μm]	0,090	0,096	0,066	0,101	0
e [μm]	$d = 0,03$	$\pm 0,25$	$\pm 0,27$	$\pm 0,19$	$\pm 0,28$	0
	$d = 0,05$	$\pm 0,20$	$\pm 0,22$	$\pm 0,15$	$\pm 0,23$	0
w	[μm]	0,32	0,34	0,21	0,32	0

2.3.2. Badania optymalizacyjne i zakresu pomiarowego interferometru

Badania optymalizacyjne i zakresu pomiarowego interferometru holograficznego podzielone zostały na badania rozpoznawcze i badania właściwe.

2.3.2.1 Badania rozpoznawcze

Metodyka i zakres badań rozpoznawczych

Badania rozpoznawcze miały na celu oświadczać o określenie wpływu wybranych czynników badanych na realizację badań właściwych. Na podstawie analizy statystycznej wyników badań rozpoznawczych za pomocą testu F wyeliminowano z dalszych badań te czynniki, których wpływ okazał się nieistotny na optymalizację warunków holograficznego określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn oraz na zakres pomiarowy interferometru holograficznego na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Do grupy czynników badanych zgodnie z wcześniej przeprowadzoną analizą w p. 1.2. zaliczono:

- chropowatość badanych powierzchni $R_a = X_1$
- kąt padania wiązki przedmiotowej $\beta = X_2$
- rodzaj materiału $M = X_3$

Czynnikiem wynikowym jest:

- kontrast prążków interferencyjnych $C = Z$

Czynnikami stałe stanowiące warunki badań są następujące:

- moc lasera He-Ne - 10 [mW]
- materiały fotograficzne firmy AGFA-GEVAERT
 - płyty - 10E75 A.H. 9x12 [cm]
 - wywoływacz - G3p
 - utrwalacz - G334

- kształt wiązek światła - fale kuliste
- kąt pomiędzy wiązkami światła - $30 \div 40^\circ$
- warunki pomiarów

Czynniki zakłócające zostały wymienione w p. 1.2.

Badania rozpoznawcze zostaną zrealizowane wg programu PS/DS-Up /program statyczny zdeterminowany selekcyjny jednoczynnikowy pojedynczy 54 /. Przyjęcie takiego programu oznacza, że będziemy określać trzy zależności funkcyjne:

$$\begin{array}{l} C = F_1 (R_a) \mid (\beta, M) = \text{const} \\ C = F_2 (\beta) \mid (R_a, M) = \text{const} \\ C = F_3 (M) \mid (R_a, \beta) = \text{const} \end{array}$$

Przyjmujemy następujące wartości badanych czynników:

$$X_1 = R_a : 0,003 - 0,057 - 0,147 [\mu\text{m}] \quad /m_1 = 3/$$

Wartości centralne pozostałych czynników

$$X_{2c} = \beta_c = 0^\circ, \quad X_{3c} = M_c = M_1 \quad /stal/$$

$$X_2 = \beta : 0 - 40 - 80^\circ \quad /m_2 = 3/$$

Wartości centralne pozostałych czynników:

$$X_{1c} = R_{ac} = 0,075 [\mu\text{m}] \quad X_{3c} = M_c = M_1 \quad /stal/$$

$$X_3 = M : M_1 - M_2 - M_3 \quad /m_3 = 3/$$

Wartości centralne pozostałych czynników

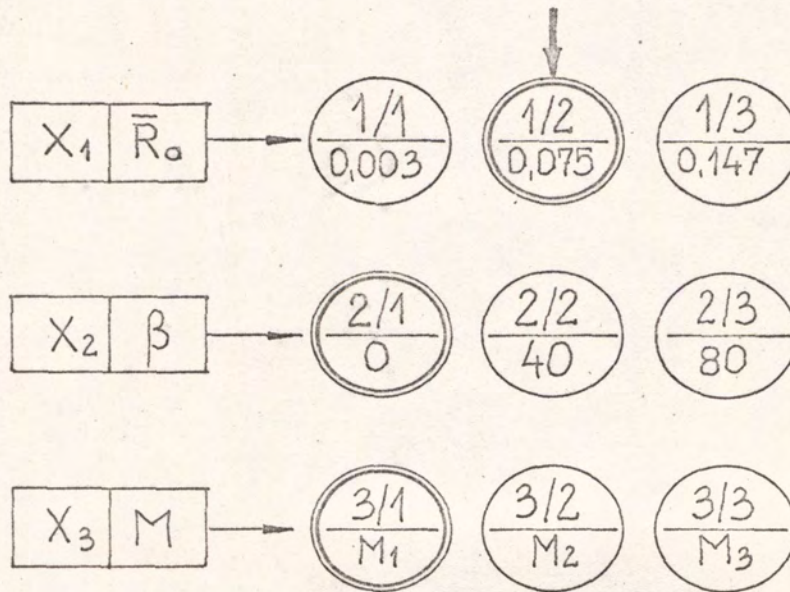
$$X_{1c} = R_{ac} = 0,075 [\mu\text{m}], \quad X_{2c} = \beta_c = 0^\circ$$

gdzie:

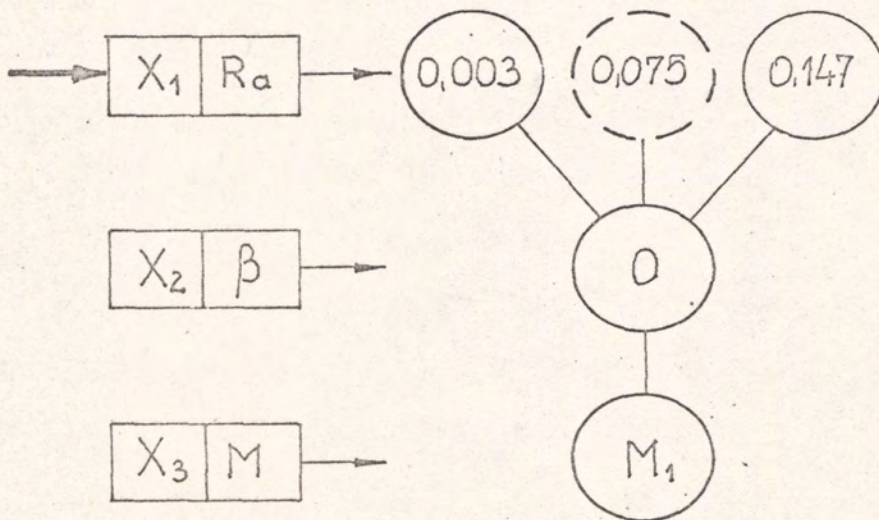
- M_1 - stal
- M_2 - żeliwo
- M_3 - miedź

Realizacja badań w oparciu o program PS/DS-Up podzielona została na następujące etapy [54] /rys. 26/.

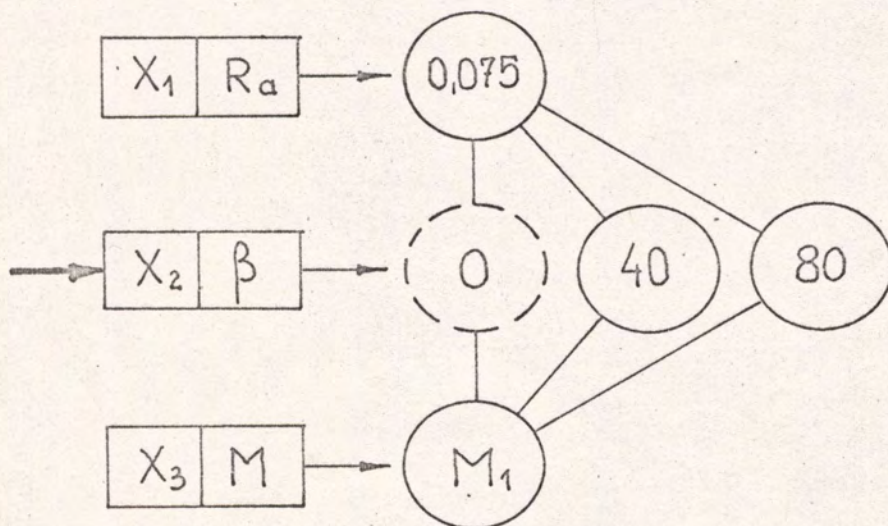
Etap 0 - selekcja



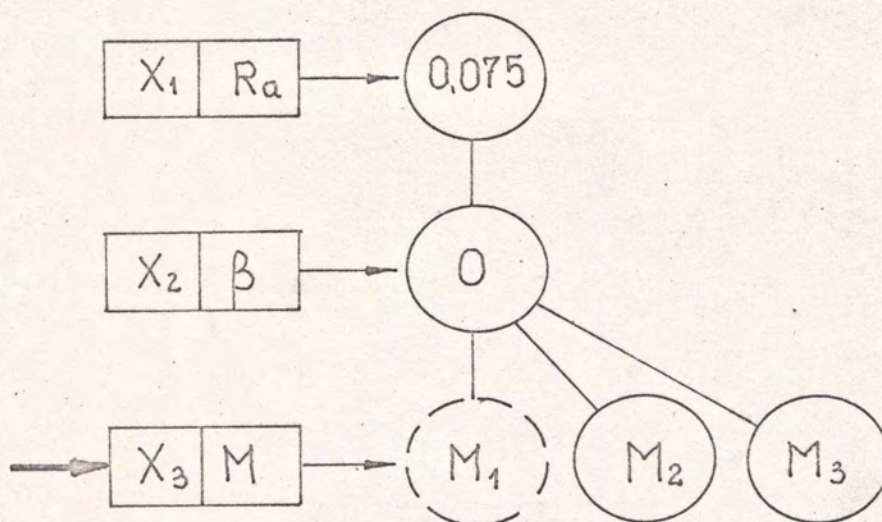
Etap 1 - badanie funkcji $c = F_1(R_a)$



Etap 2 - badanie funkcji $C = F_2(\beta)$



Etap 3 - badanie funkcji $C = F_3(M)$



Rys. 26. Schemat realizacji programu PS/DS-Up w badaniach rozpoznawczych wpływu chropowatości R_a , kąta padania oraz rodzaju materiału M na kontrast prążków interferencyjnych C

- Etap 0 - selekcja wartości badanych czynników x_i i ustalenie wartości centralnych,
- Etap 1 - badania doświadczalne funkcji $C = F_1(Ra)$ przy ustalonych wartościach centralnych wszystkich pozostałych czynników,
- Etap 2 - badania doświadczalne funkcji $C = F_2(\beta)$ przy ustalonych wartościach centralnych wszystkich pozostałych czynników,
- Etap 3 - badania doświadczalne funkcji $C = F_3(M)$ przy ustalonych wartościach centralnych wszystkich pozostałych czynników.

Badania te wymagają realizacji następującej liczby pomiarów [54]

$$N = r \left[(1 + m_1 + m_2 + m_3) - i \right]$$

gdzie:

- r - liczba powtórzeń pomiarów $/r = 6/$
 m_k - liczba wartości dla każdego z badanych czynników
 $m_1 = 3; m_2 = 3; m_3 = 3$
 i - liczba badanych czynników

czyli:

$$N = 6 \left[(1 + 3 + 3 + 3) - 3 \right] = 42 \text{ pomiary}$$

Dla czynników istotnych na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, należy określić funkcję kontrastu metodą analizy regresji. Funkcję kontrastu prążków interferencyjnych określono po badaniach właściwych dla wszystkich czynników istotnych na poziomie $\alpha = 0,05$ łącznie.

Metody pomiarów

Pomiar wielkości związanych bezpośrednio z realizacją badań rozpoznawczych i właściwych:

1. Pomiar chropowatości badanych powierzchni.

Pomiar parametru R_a wykonano za pomocą przyrządu SURFATRONIC firmy Taylor Hobson. Wynik pomiaru jest średnią arytmetyczną dziesięciu pomiarów wartości R_a wykonanych w różnych miejscach badanej powierzchni. Pomiar parametru R_z wykonano za pomocą przyrządu TALYSURF-4 firmy Taylor Hobson.

2. Pomiar kąta padania β , przeprowadzono jak w przypadku badań dokładności interferometru holograficznego p. 2.3.1.

3. Pomiar kontrastu prążków interferencyjnych C.

Kontrast prążków interferencyjnych zgodnie z /1.10/ obliczamy:

$$C = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}}$$

gdzie:

J_{\max} - natężenie prążka jasnego

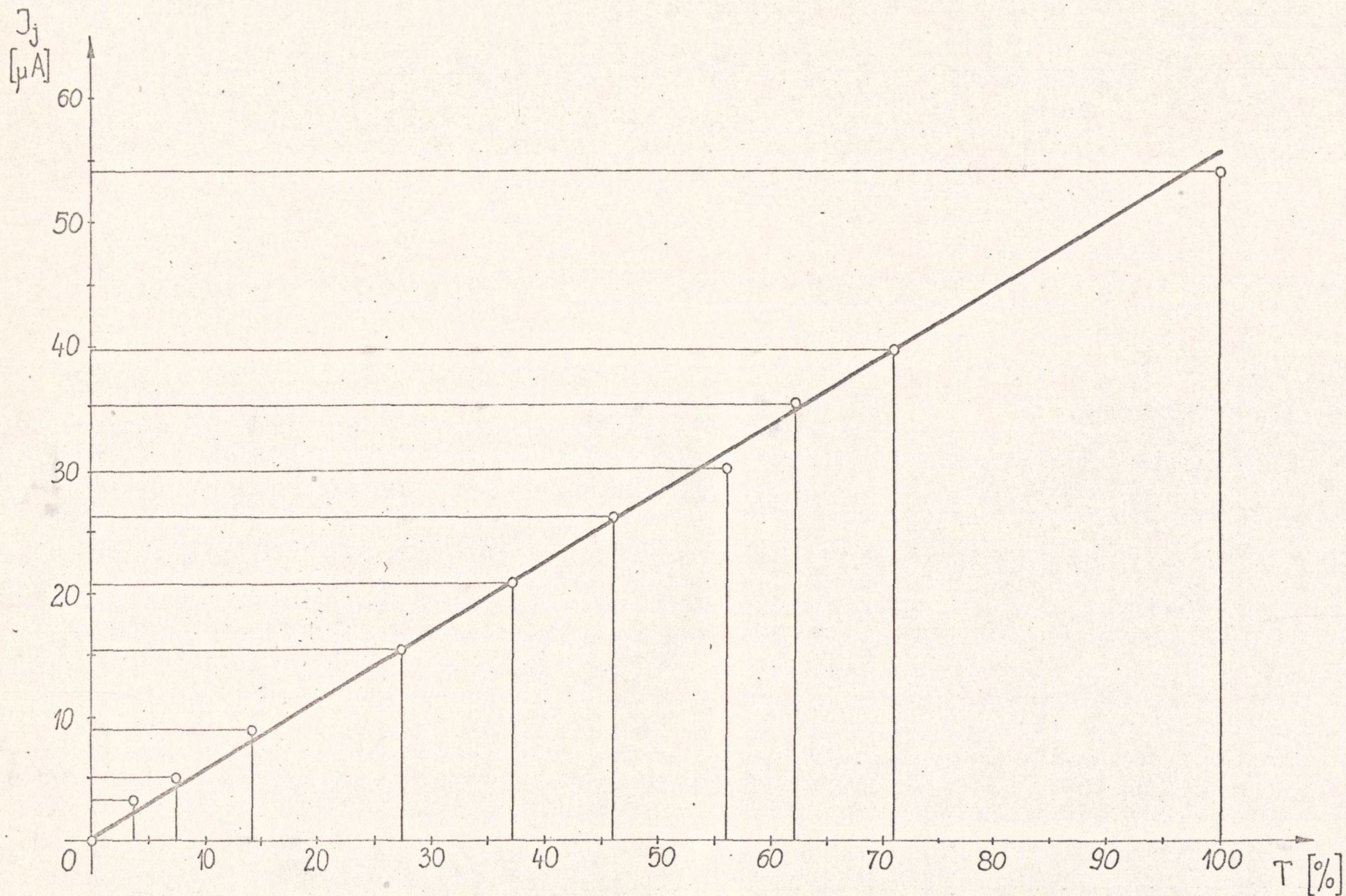
J_{\min} - natężenie prążka ciemnego

Pomiary wartości J_{\max} i J_{\min} wykonane zostały przy użyciu miernika z odczytem cyfrowym DIGITAL MULTIMETER VC-10T, poprzez czujnik-fotodiode krzemową oraz układ zbudowany na scalonym wzmacniaczu operacyjnym pa 741C. Adekwatność pomiarów przy użyciu takiego czujnika zależy głównie od liniowości wskazań fotodiody oraz wpływów przypadkowych. Przed przystąpieniem do pomiarów sporządzono charakterystykę tego czujnika rys. 27, aby w razie konieczności uwzględnić poprawkę do surowego wyniku, wynikającą z nieliniowości wskazań ww. czujnika. Wyniki badań zostały przedstawione w tablicy 17.

TABLICA 17. Wyniki badań liniowości wskazań czujnika używanego do pomiaru kontrastu

Lp	T [%]	J_{ji} [μA]				\bar{J}_j
		$j = 1 \dots\dots\dots 11$ $i = 1 \dots\dots\dots 4$				
		1	2	3	4	
1	0	0	0	0	0	0
2	3,6	4	3	3	3	3,25
3	7,4	5	5	5	5	5
4	14	10	9	8	8	8,75
5	27	17	13	16	15	15,25
6	37	22	20	21	20	20,75
7	46	28	25	26	26	26,25
8	56	30	30	30	30	30
9	62	36	35	35	35	35,25
10	71	40	39	39	39	39,25
11	100	55	54	54	53	54

Do zmiany natężenia wiązki światła stosowane były filtry neutralne o znanej transmisji dla danej długości fali.



Rys. 27. Zależność wskazań czujnika od zmiany natężenia wiązki światła lasera He-Ne
 $\lambda = 0,6328 \text{ } [\mu m]$

- 131 -

Z wykresu rys. 27 widać, że czujnik posiada charakterystykę liniową. Wyniki te pokrywają się z danymi literaturowymi tego typu czujników. Analizy wyników pomiarów nie przeprowadzono ponieważ to nie wchodzi w zakres pracy.

Ostatecznie do określania kontrastu prążków interferencyjnych przyjmowano wartości bezpośrednio wskazane na mierniku.

Wyniki badań rozpoznawczych

Wyniki badań kontrastu prążków interferencyjnych w badaniach rozpoznawczych zostały przedstawione w tablicy 18.

Kolejność prowadzonych doświadczeń została ustalona na podstawie małej tablicy liczb losowych [83].

Przedstawione wyniki badań doświadczalnych zrealizowane wg programu PS/DS-Up stanowiły podstawę do statystycznej analizy istotności wpływu czynników badanych na kontrast prążków.

Analiza statystyczna wyników badań rozpoznawczych

Analiza statystyczna wyników badań rozpoznawczych przeprowadzonych wg programu PS/DS-Up ma na celu statystyczną ocenę istotności wpływu czynników badanych na kontrast prążków interferencyjnych przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn na interferometrze holograficznym. Wyniki badań zestawione w tablicy 18 posłużyły do przeprowadzenia statystycznej oceny istotności za pomocą testu F wg schematu przedstawionego w p. 2.3.1. przy określaniu dokładności interferometru holograficznego.

Wyniki powyższych obliczeń zestawiono w tablicach 19, 20, 21.

TABLICA 18. Wyniki badań rozpoznawczych

Lp	ETAP - 1			ETAP - 2			ETAP - 3		
	Badany czynnik		Ra [μm]	Badany czynnik		β [$^\circ$]	Badany czynnik		M
	WARTOŚCI			WARTOŚCI			WARTOŚCI		
	0,003	0,075	0,147	0	40	80	M ₁	M ₂	M ₃
	Nr kolejny doświadczenia			Nr kolejny doświadczenia			Nr kolejny doświadczenia		
	3	1	2	1	3	2	2	3	1
	Czynnik wynikowy		C	Czynnik wynikowy		C	Czynnik wynikowy		C
WARTOŚCI			WARTOŚCI			WARTOŚCI			
1	0,62	0,28	0,10	0,28	0,50	0,70	0,28	0,26	0,34
2	0,60	0,32	0,12	0,32	0,48	0,65	0,32	0,30	0,33
3	0,57	0,30	0,09	0,30	0,45	0,68	0,30	0,36	0,27
4	0,58	0,34	0,07	0,34	0,52	0,74	0,34	0,28	0,32
5	0,64	0,31	0,11	0,31	0,53	0,72	0,31	0,25	0,29
6	0,59	0,29	0,09	0,29	0,51	0,74	0,29	0,29	0,32

- 133 -

TABLICA 19. Statystyczna analiza istotności wpływu chropowatości R_a [μm] na kontrast prążków interferencyjnych

A.

$X_1 = R_a$	[μm]	0,003		0,075		0,147		
C_{ji}/C_{ji}^2	1	0,62	0,3844	0,28	0,0784	0,10	0,0100	
	2	0,60	0,3600	0,32	0,1024	0,12	0,0144	
	3	0,57	0,3249	0,30	0,0900	0,09	0,0081	
	4	0,58	0,3364	0,34	0,1156	0,07	0,0049	
	5	0,64	0,4096	0,31	0,0961	0,11	0,0121	
	6	0,59	0,3481	0,29	0,0841	0,09	0,0081	$m_k = 3$
	r_j	6	—	6	—	6	—	$N = 18$
$(\sum_i c)_{.j}$		3,6		1,84		0,58		$\sum_j \sum_i c = 6,02$
$\bar{c}_{.j}$		0,6		0,31		0,1		$\bar{c} = 0,3367$
$(\sum_i c^2)_{.j}$		—	2,1634	—	0,5666	—	0,0576	$\sum_j \sum_i c^2 = 2,7876$
$[(\sum_i c)_{.j}]^2$		12,9600	—	3,3856	—	0,3364	—	$\Delta c = 2,0134$
T_j		2,1600	—	0,5643	—	0,0561	—	$\sum_i T_j = 2,7804$

B.

	SQ	f	$s^2(c)$	F	α	F_{d, f_2, f_1}	Wynik testu
c	0,7742	—	—	767	0,10	2,70	istotny
ip	0,7670	$f_2 = 2$	0,3835		0,05	3,68	istotny
P	0,0072	$f_1 = 15$	0,0005		0,01	6,36	istotny



TABLICA 20. Statystyczna analiza istotności wpływu kąta padania [°] [rd] na kontrast prążków interferencyjnych

A.

$x_2 = \beta$	[rd]	0		0,70		1,40		
	[°]	0		40		80		
c_{ji}/c_{ji}^2	1	0,28	0,0784	0,50	0,2500	0,70	0,4900	$m_k = 3$
	2	0,32	0,1024	0,48	0,2304	0,65	0,4225	
	3	0,30	0,0900	0,45	0,2025	0,68	0,4624	
	4	0,34	0,1156	0,52	0,2704	0,74	0,5476	
	5	0,31	0,0961	0,53	0,2809	0,72	0,5184	
	6	0,29	0,0841	0,51	0,2601	0,74	0,5476	
	r_j	6	—	6	—	6	—	$N = 18$
$(\sum_i c)_{j\cdot}$		1,84		2,99		4,23		$\sum_j \sum_i c = 9,06$
\bar{c}_j		0,31		0,50		0,71		$\bar{c} = 0,51$
$(\sum_i c^2)_{j\cdot}$		—	0,5666	—	1,4942	—	2,9885	$\sum_j \sum_i c^2 = 5,0493$
$[(\sum_i c)_{j\cdot}]^2$		3,3856	—	8,9401	—	17,8929	—	$\Delta c = 4,5602$
T_j		0,5643	—	1,4900	—	2,9822	—	$\sum_i T_j = 5,0365$

B.

	SQ	f	$s^2(c)$	F	F_{d,f_2,f_1}	Wynik testu	
c	0,4891	—	—		0,10	2,70	istotny
ip	0,4763	$f_2 = 2$	0,2382	246,7	0,05	3,68	istotny
p	0,4128	$f_1 = 15$	0,0009		0,01	6,36	istotny

TABLICA 21. Statystyczna analiza istotności wpływu rodzaju materiału M na kontrast prążków interferencyjnych

A.

$X_3 = M$	—	M_1 /stal/		M_2 /żeliwo/		M_3 /miedź/		
c_{ji} / c_{ji}^2	1	0,28	0,0784	0,26	0,0676	0,34	0,1156	
	2	0,32	0,1024	0,30	0,0900	0,33	0,1089	
	3	0,30	0,0900	0,36	0,1296	0,27	0,0729	
	4	0,34	0,1156	0,28	0,0784	0,32	0,1024	
	5	0,31	0,0961	0,25	0,0625	0,29	0,0841	
	6	0,29	0,0841	0,29	0,0841	0,32	0,1024	
	r_j	6	—	—	—	—	—	
$(\sum_j c_j)$		1,84		1,74		1,87		$\sum_j \sum_i c = 5,45$
\bar{c}_j		0,31		0,29		0,31		$\bar{c} = 0,30$
$(\sum_i c^2)_j$		—	0,5666	—	0,5122	—	0,5863	$\sum_j \sum_i c^2 = 1,6651$
$[(\sum_i c)]_j^2$		3,3856	—	3,0276	—	3,4969	—	$\Delta c = 1,6501$
T_j		0,5643	—	0,5046	—	0,5828	—	$\sum_i T_j = 1,6517$

B.

	SQ	f	$s^2(c)$	F		F_{d, f_2, f_1}	Wynik testu
c	0,0150	—	—	0,89	0,10	2,70	nieistotny
ip	0,0016	$f_2 = 2$	0,0008		0,05	3,68	nieistotny
p	0,0134	$f_1 = 15$	0,0009		0,01	6,36	nieistotny

Analiza istotności wpływu:

1. Chropowatości R_a badanych powierzchni wykazała, że

$$F = 767 > F_{0,1,2,15} = 2,70 > F_{0,05,2,15} = \\ = 3,68 > F_{0,01,2,15} = 6,36$$

2. Kąta padania wiązki przedmiotowej β wykazała, że

$$F = 264,7 > F_{0,1,2,15} = 2,70 > F_{0,05,2,15} = \\ = 3,68 > F_{0,01,2,15} = 6,36$$

3. Rodzaju materiału M badanych powierzchni wykazała, że

$$F = 0,89 < F_{0,01,2,15} = 6,36 < F_{0,05,2,15} = \\ = 3,68 < F_{0,1,2,15} = 2,70$$

Upoważnia to do wniosku, że wpływ chropowatości badanych powierzchni oraz kąta padania wiązki przedmiotowej na kontrast prążków interferencyjnych jest wpływem istotnym zarówno na poziomie istotności $\alpha = 0,01$, $\alpha = 0,05$ jak również $\alpha = 0,1$. Wpływ rodzaju materiału przy odpowiednio dobranym stosunku natężeń interferujących wiązek światła jest wpływem nieistotnym na ww. poziomach istotności. Wynika z tego, że dla chropowatości oraz kąta padania należy określić funkcję kontrastu badanego obiektu. Funkcja kontrastu prążków interferencyjnych została określona w badaniach właściwych.

2.3.2.2. Wnioski i zalecenia do badań właściwych

W następnym etapie badań rozpoznawczych należałoby dla czynników istotnych określić metodą analizy regresji funkcję kontrastu prążków interferencyjnych, lecz realizacja programu PS/DS-Up pozwala jedynie na określenie wpływu pojedynczych badanych czynników przy ustalonych wartościach centralnych pozostałych czynników. Takie postępowanie nie daje adekwatnej informacji o badanym obiekcie, ponieważ nie uwzględnia interakcji pomiędzy badanymi czynnikami, a która może mieć zasadniczy wpływ na informacje o badanym obiekcie.

Proponuje się aby dla czynników, których wpływ okazał się istotny na kontrast prążków interferencyjnych w badaniach rozpoznawczych, przeprowadzić badania właściwe, które pozwoliłyby na określenie jednoczesnego wpływu wszystkich istotnych czynników badanych. Opracowanie funkcji kontrastu w formie wzoru empirycznego, który ujmowałby jednocześnie wpływ wszystkich czynników istotnych związane jest ściśle z wyborem określonego programu badań doświadczalnych.

Proponuje się aby badania właściwe, których celem jest określenie funkcji obiektu, danej jakościowym modelem matematycznym

$$z = F(x_1, x_2)$$

charakteryzującym kontrast prążków interferencyjnych prowadzić wg programu PS/DS-P: λ_m /program statyczny zdeterminowany selekcyjny, wieloczynnikowy quasi-rototabilny [54]. Program ten przyjęto zakładając, że funkcja obiektu badań może mieć charakter nieliniowy, tzn. może stanowić wielomian drugiego stopnia mający postać:

$$Z = b_0 + \sum_{k=1}^i b_k X_k + \sum_{1 \leq k < q \leq i} b_{qk} X_k \cdot X_q$$

gdzie:

- i - liczba czynników badanych
- k, q - zmienne przypadkowe /1,2,3,...,i/
- z - czynnik wynikowy
- x_k, x_q - czynniki badane
- b_0, b_k, b_{qk} - współczynniki regresji

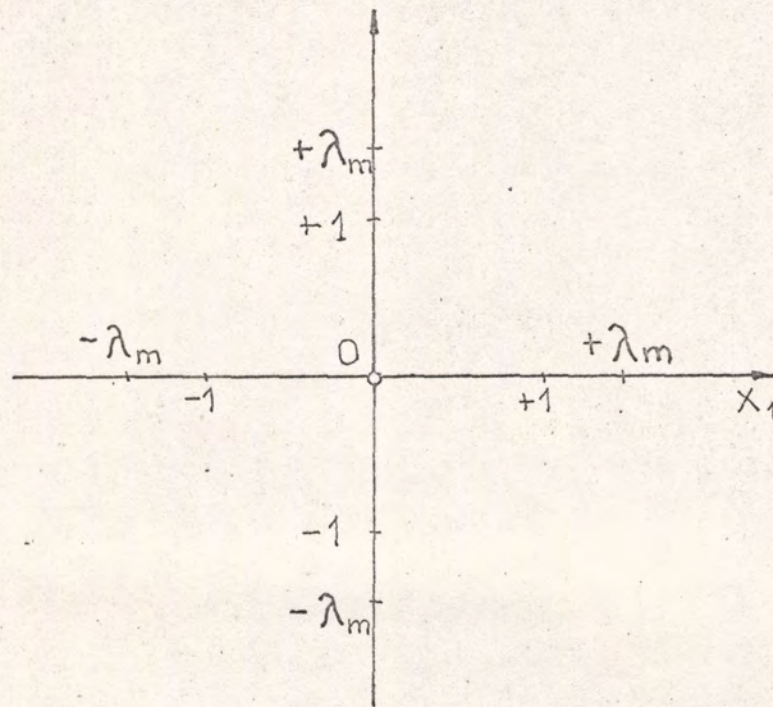
Może się okazać, że analiza statystyczna istotności wykaże, że $b_{kq} = 0$, wówczas istnieje możliwość przejścia na liniową funkcję obiektu badań. Program ten opracowany po raz pierwszy przez G.E.P. Boxa i J.S. Huntera [41] zapewnia rototabilność tzn. pozwala na uzyskanie informacji, która jest zawarta w równaniu regresji na powierzchni kuli [26; 41] lub inaczej pozwala otrzymać równanie regresji z minimum wariancji w równych odległościach od punktu centralnego we wszystkich kierunkach przestrzeni czynnikowej [90]. Ponadto [41] plan rototabilny stosujemy gdy dążymy do osiągnięcia minimum błędów systematycznych, związanych z nieadekwatnością przedstawienia wyników badań w postaci wielomianu drugiego stopnia. Zachowanie rototabilności uzyskuje się dzięki specjalnej kompozycji czynników badanych, stanowiących układy pomiarowe.

2.3.2.3. Badania właściwe

Metodyka i zakres badań właściwych

Badania właściwe miały na celu poznanie wpływu na badany proces tych czynników, których wpływ uznano za istotny po badaniach rozpoznawczych tzn. chropowatości badanych powierzchni oraz kąta padania wiązki przedmiotowej. Czynniki stałe oraz zakłócające wymienione w p. 2.3.2.1. pozostają niezmiennicze. Badania zostały przeprowadzone wg programu PS/DS-P: $\bar{\lambda}_m$ 54. Jak już wcześniej wspomniano cechą charakterystyczną powyższego programu jest zachowanie rototabilności dzie-

ki specjalnej kompozycji wartości czynników badanych, stanowiących układy pomiarowe wg kodowych wartości czynników badanych rys. 28, a przyjmowane wg tablicy 22.



Rys. 28. Schemat kompozycji kodowych wartości badanych czynników w programie PS/DS-P: λ_m dla dwóch czynników badanych /i=2/

Program ten wymaga realizacji pomiarów dla następujących układów, tablica 22.

TABLICA 22. Charakterystyczne wartości programu PS/DS-P: λ_m [54]

i	λ_m	m_i	m_{i2}	m_0	$m \lambda_m$	N
2	1,414	5	2^2	5	4	13

Z tablicy 22 widać, że program ten scharakteryzowany jest przez wartości λ_m oraz przez stałą liczbę wartości badanych czynników m :

- wartości badanych czynników, odpowiadające wartościom oznaczonym kodowo "±1" /rys.28/, są to układy stanowiące, tzw. "jądro programu", których liczba wynosi $m_k = 2^i$, tablica 22,
- wartości badanych czynników, odpowiadające wartościom oznaczonym kodowo "0" /rys. 28/, są to układy stanowiące tzw. "centrum programu", których liczba wynosi m_0 , tablica 22,
- wartości badanych czynników, odpowiadające wartościom oznaczonym kodowo " $\pm\lambda_m$ " /rys. 28/, są to układy stanowiące tzw. "punkty gwiazdne", których liczba wynosi m_{λ_m} , tablica 22.

Przyjęcie wartości kodowych umożliwiło obliczenie funkcji regresji, łącznie z oceną istotności współczynników regresji za pomocą testu t-Studenta. Powyższy program został zastosowany do badań doświadczalnych następującej zależności funkcyjnej

$$C = F(Ra, \beta)$$

gdzie:

- Ra - chropowatość badanych powierzchni
- kąt padania wiązki przedmiotowej
- C - kontrast prążków interferencyjnych stanowiący kryterium optymalizacji holograficznego, określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn oraz podstawę do ilościowej oceny zakresu pomiarowego interferometru holograficznego.

Założono model matematyczny kontrastu prążków interferencyjnych w postaci wielomianu drugiego stopnia z podwójnymi interakcjami:

$$z = b_0 + b_1 \check{x}_1 + b_2 \check{x}_2 + b_{11} \check{x}_1^2 + b_{22} \check{x}_2^2 + b_{12} \check{x}_1 \check{x}_2$$

gdzie:

\check{x}_1, \check{x}_2 - kodowe wartości odpowiednich czynników badanych $x_1 = Ra$ i $x_2 = \beta$

$b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ - współczynniki regresji.

Przyjęto niżej podane zakresy wartości czynników badanych:

1. Chropowatość - $Ra = x_1 : 0,003 \div 0,147 [\mu m]$
($Rz = x_1 : 0,01 \div 0,61 [\mu m]$)
2. Kąt padania - $\beta = x_2 : 0 \div 80 [^\circ]$
($\beta = x_2 : 0 \div 1,4 [rd]$)

Wartości centralne wyliczono:

- dla Ra

$$x_{10} = \frac{x_{1 \min} + x_{1 \max}}{2} = \frac{0,003 + 0,147}{2} = 0,075 [\mu m]$$

- dla Rz

$$x_{10} = \frac{x_{1 \min} + x_{1 \max}}{2} = \frac{0,01 + 0,61}{2} = 0,31 [\mu m]$$

- dla β

$$x_{20} = \frac{x_{2 \min} + x_{2 \max}}{2} = \frac{0 + 80}{2} = 40 [^\circ] = 0,7 [rd]$$

Jednostki zmienności określono przyjmując tablica 22 obowiązujące dla programu PS/DS-P: λ_m wartości:

$$\lambda_m = 1,414 \quad /i \neq 2, \quad m_i = 5/$$

$$\Delta x_1 = \frac{x_{1 \max} - x_{10}}{\lambda_m} = \frac{0,147 - 0,075}{1,414} = 0,51 [\mu m] \quad - \text{dla } Ra$$

oraz odpowiednio $x_1 = 0,21 [\mu m]$ - dla Rz

$$\Delta x_2 = \frac{x_{2 \max} - x_{20}}{\lambda_m} = \frac{80 - 40}{1,414} = 28 [^\circ] = 0,49 [rd]$$

Pozwoliło to na określenie następujących relacji kodowych:

$$\check{x}_1 = \frac{x_1 - 0,075}{0,051} \text{ - dla } R_a, \quad \check{x}_1 = \frac{x_1 - 0,31}{0,21} \text{ - dla } R_z$$

$$\check{x}_2 = \frac{x_2 - 40}{28} \text{ odpowiednio } \check{x}_2 = \frac{x_2 - 0,7}{0,49}$$

Oznacza to jednocześnie przyjęcie kodu

$$\begin{aligned} \text{"} +\lambda_m \text{" } x_1 (+\lambda_m) &= x_{10} + \lambda_m \Delta x_1 = x_1 \text{ max} = 0,147 [\mu\text{m}] \Big|_{R_a} \\ &\text{ oraz } x_1 (+\lambda_m) = 0,61 [\mu\text{m}] \Big|_{R_z} \end{aligned}$$

$$x_2 (+\lambda_m) = x_{20} + \lambda_m \Delta x_2 = x_2 \text{ max} = 80 [^\circ] = 1,4 [\text{rd}]$$

$$\begin{aligned} \text{" } +1 \text{" } x_1 (+1) &= x_{10} + \Delta x_1 = 0,075 + 0,051 = 0,126 [\mu\text{m}] \Big|_{R_a} \\ &\text{ oraz } x_1 (+1) = 0,52 [\mu\text{m}] \Big|_{R_z} \end{aligned}$$

$$x_2 +1 = x_{20} + \Delta x_2 = 40 + 28 = 68 [^\circ] = 1,19 [\text{rd}]$$

$$\begin{aligned} \text{" } 0 \text{" } x_1 (0) &= x_{10} = 0,075 [\mu\text{m}] \Big|_{R_a} \\ &\text{ oraz } x_1 (0) = 0,31 [\mu\text{m}] \Big|_{R_z} \end{aligned}$$

$$x_2 (0) = x_{20} = 40 [^\circ] = 0,7 [\text{rd}]$$

$$\begin{aligned} \text{" } -1 \text{" } x_1 (-1) &= x_{10} - \Delta x_1 = 0,075 - 0,051 = 0,024 [\mu\text{m}] \Big|_{R_a} \\ &\text{ oraz } x_1 (-1) = 0,10 [\mu\text{m}] \Big|_{R_z} \end{aligned}$$

$$x_2 (-1) = x_{20} - \Delta x_2 = 40 - 28 = 12 [^\circ] = 0,21 [\text{rd}]$$

$$\text{" } -\lambda_m \text{" } x_{10} (-\lambda_m) = x_{10} - \lambda_m \Delta x_1 = x_1 \text{ min} = 0,003 [\mu\text{m}] \Big|_{R_a}$$

$$\text{oraz } x_1(-\lambda_m) = 0,01 \text{ } [\mu\text{m}] \quad \Bigg| \quad \text{Rz}$$
$$x_2(-\lambda_m) = x_{20} + \lambda_m \Delta x_2 = x_{2 \text{ min}} = 0[^\circ] = 0 \text{ } [\text{rd}]$$

Realizacja programu PS/DS-P: λ_m wymagała wykonania pomiarów dla czterech układów ($m_k = 2^1 = 2^2 = 4$) w jądrze programu, czterech układów ($m_{\lambda_m} = 2.1 = 2.2 = 4$) w punktach gwiazdnych oraz dodatkowo pięciu pomiarów paralelnych dla układu w centrum programu ($m_0 = 5$), czyli łączna ilość pomiarów wynosiła:

$$N = r (m_k + m_{\lambda_m} + m_0) = r (4 + 4 + 5) = 13 r \text{ pomiarów}$$

gdzie:

r - liczba powtórzeń dla każdego układu
/można przyjąć $r = 1$ lub $r > 1$ i określić $z = \bar{z}$ /

Pomiary kontrastu prążków interferencyjnych tzn. czynnika wynikowego przeprowadzono:

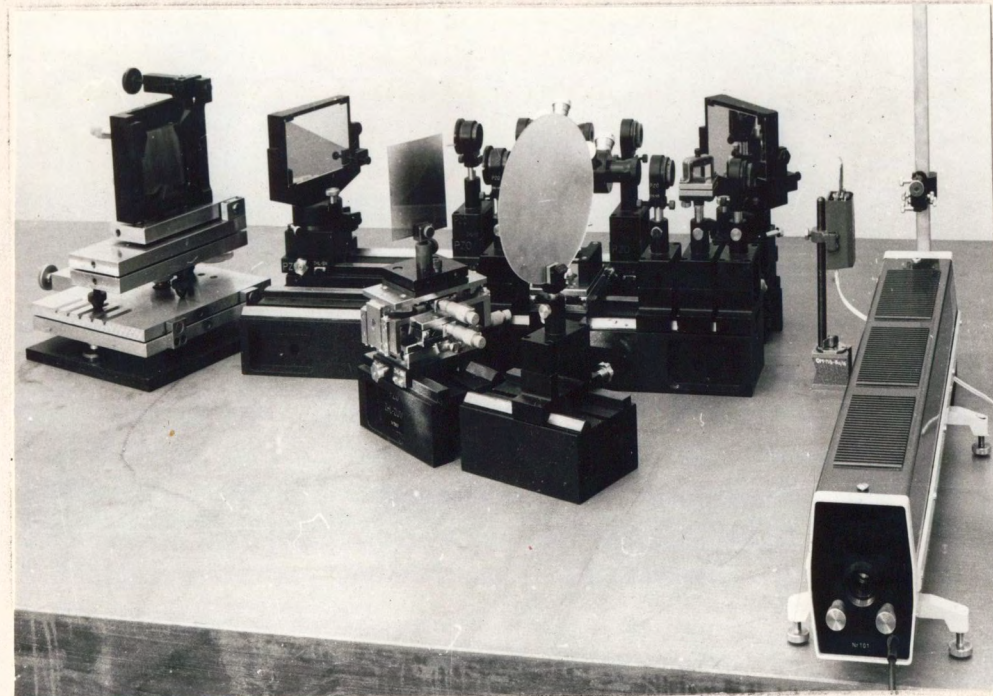
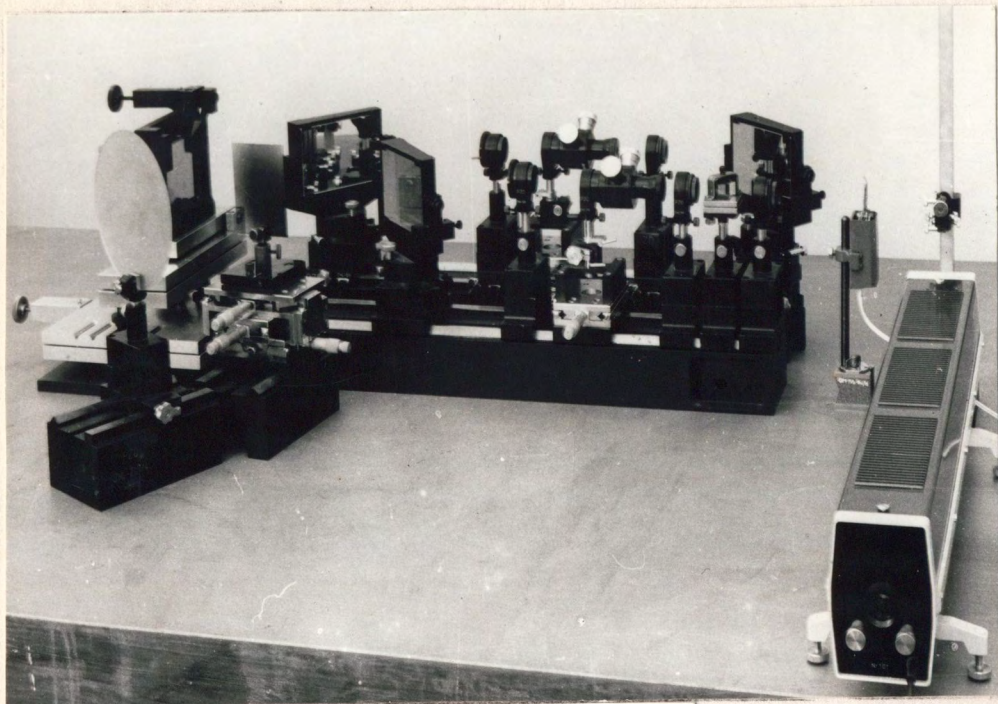
- bez filtracji częstości przestrzennych,
- z filtracją częstości przestrzennych.

Odpowiednie układy interferometru holograficznego dla poszczególnych kątów padania wiązki przedmiotowej przedstawiono na rys. 29.

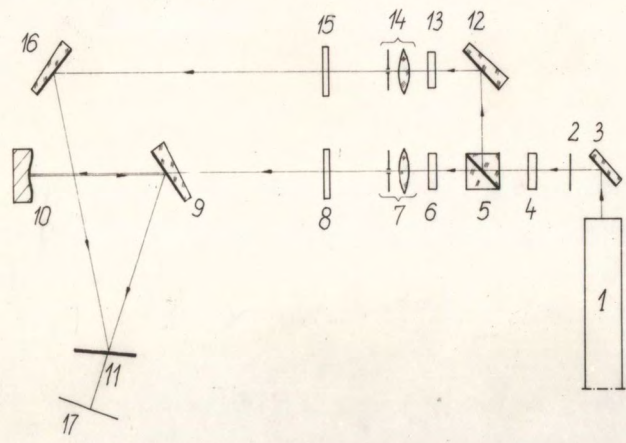
Schemat realizacji programu PS/DS-P: λ_m przedstawiono w tabelicy 23.

Przedstawiona metodyka i zakres badań właściwych stanowi podstawę do określenia ilościowych zależności funkcyjnych pomiędzy kontrastem prążków interferencyjnych a wartościami charakteryzującymi metodę określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn tj. chropowatością badanych powierzchni - R_a / R_z / oraz kątem padania wiązki przedmiotowej - β .

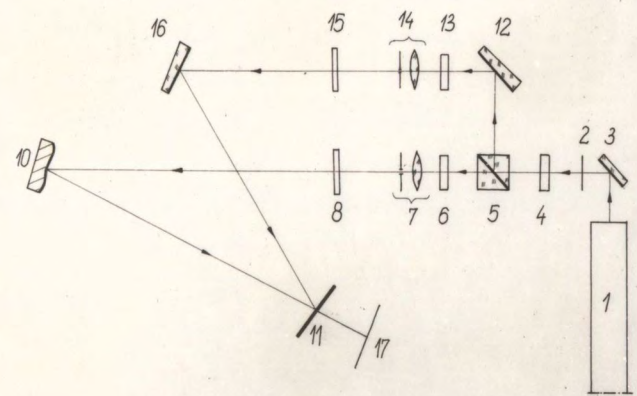
Metody pomiarów pozostają takie same jak w p.2.3.2.1.
- badania rozpoznawcze.



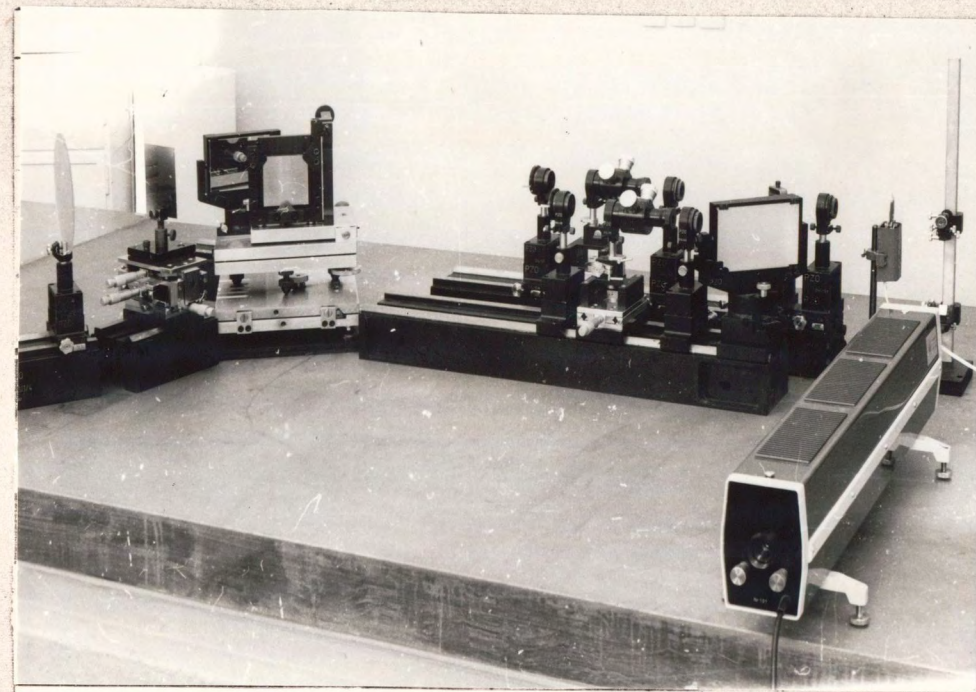
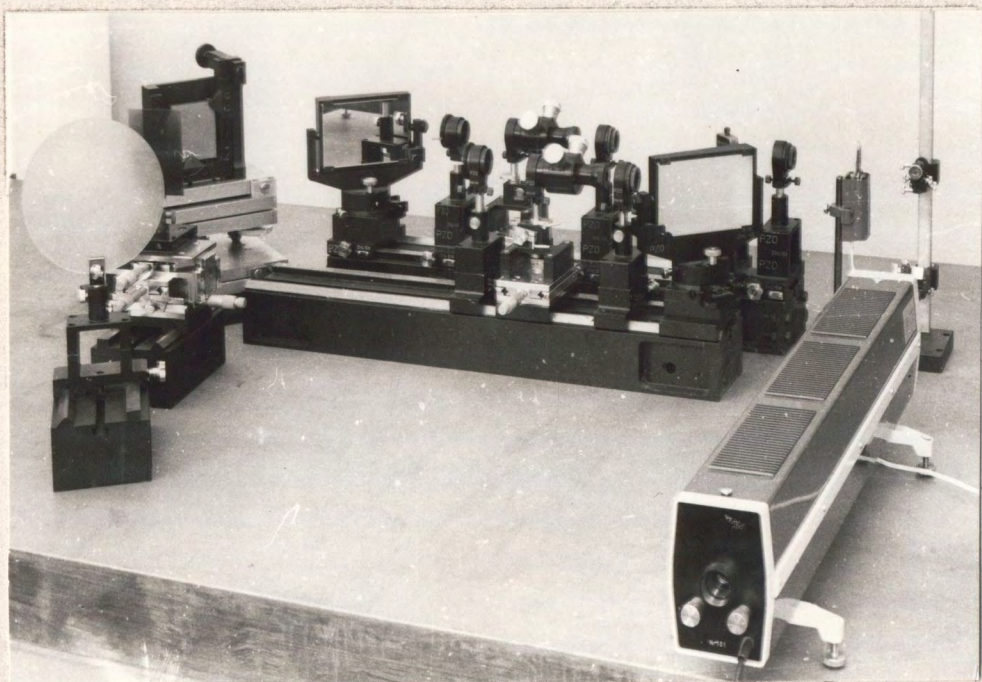
-145-11



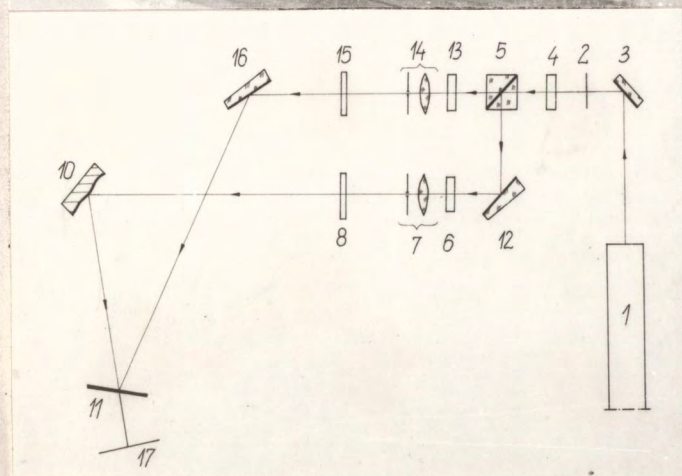
$\beta = 0^\circ$



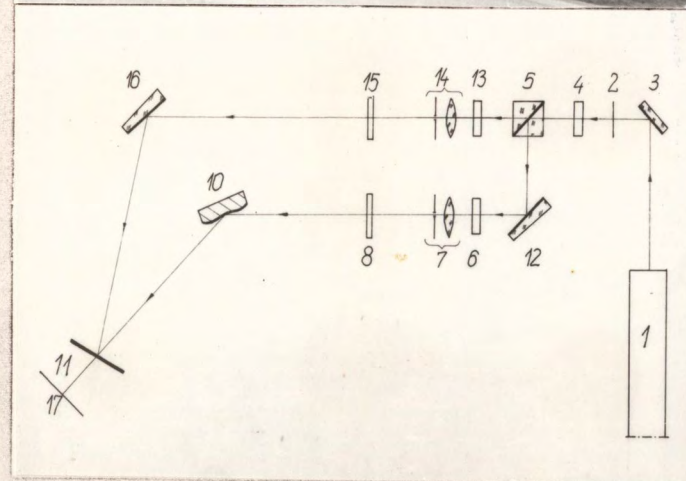
$\beta = 12^\circ$



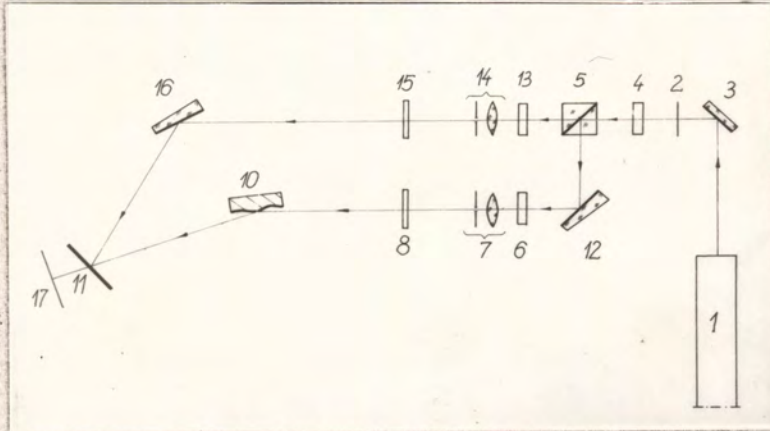
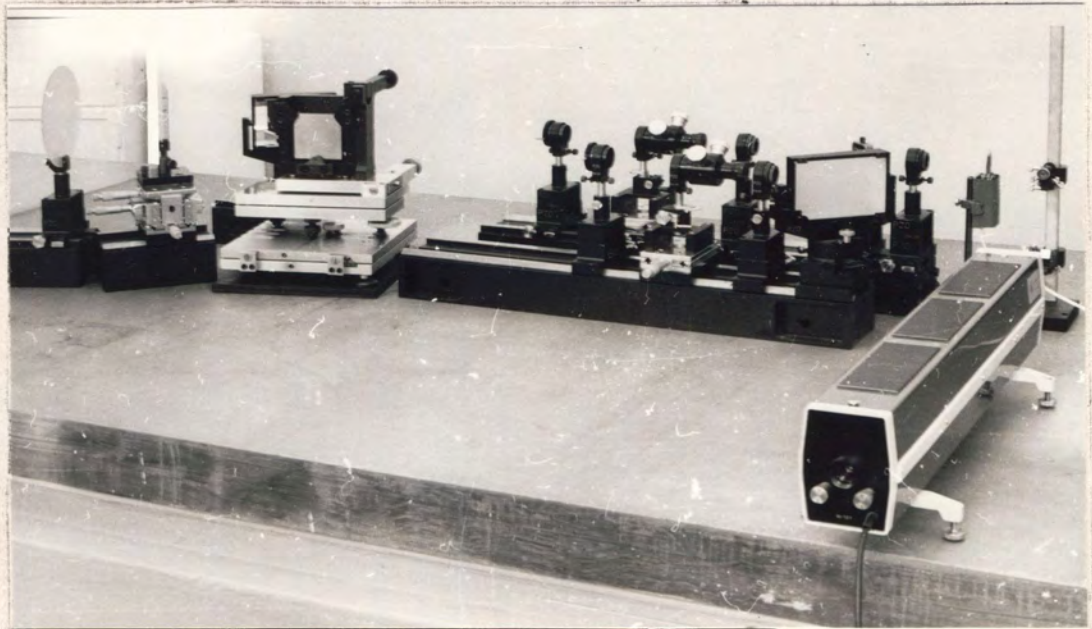
- 146 -



$\beta = 40^\circ$



$\beta = 68^\circ$



$$\beta = 80^\circ$$

Rys. 29. Układy interferometru holograficznego dla poszczególnych kątów padania wiązki przedmiotowej /oznaczenia na schematach są zgodne z oznaczeniami - rys. 21 b/

TABLICA 23. Schemat realizacji programu PS/DS-P: λ_m
 przy: $i = 2$, $n_0 = 5$, $\lambda = 1,414$

Badany czynnik X_k	Jednos- tka	Jedn. zmienn- ości ΔX_k	Kod: $\lambda_m = 1,414$				
			$-\lambda_m$	-1	0	+1	$+\lambda_m$
X_1	R_a	0,051	0,003	0,024	0,075	0,126	0,147
	R_z [μm]	0,21	0,01	0,10	0,31	0,42	0,61
X_2	stopnie	28	0	12	40	68	80
	radianty	0,49	0	0,21	0,7	1,19	1,4

Lp	Badane czynniki		Czynnik wynikowy Z
	K O D		
	\check{X}_1	\check{X}_2	
1	-1	-1	Z_1
2	-1	+1	Z_2
3	+1	-1	Z_3
4	+1	+1	Z_4
5	$-\lambda_m = -1,414$	0	Z_5
6	$+\lambda_m = +1,414$	0	Z_6
7	0	$-\lambda_m = -1,414$	Z_7
8	0	$+\lambda_m = +1,414$	Z_8
9	0	0	Z_9
10	0	0	Z_{10}
11	0	0	Z_{11}
12	0	0	Z_{12}
13	0	0	Z_{13}

Wyniki badań właściwych

Wyniki badań kontrastu prążków interferencyjnych w badaniach właściwych przedstawiono w tabelicy 24.

Kolejność prowadzonych doświadczeń ustalono na podstawie małej tabelicy liczb losowych [83] przy trzech powtórzeniach każdego doświadczenia $r = 3$.

Przedstawione wyniki badań doświadczalnych zrealizowanych wg programu PS/DS-P λ_m stanowiły podstawę do ich analizy obejmującej zarówno analizę statystyczną wyników badań właściwych jak również analizę merytoryczną, dla określenia związków przyczynowych pomiędzy czynnikami charakteryzującymi kontrast prążków interferencyjnych a zakresem pomiarowym interferometru holograficznego oraz z punktu widzenia optymalizacji umożliwiły określenie optymalnej wartości chropowatości badanych powierzchni jak również kąta padania wiązki przedmiotowej dla określonych warunków określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn - optymalizując kontrast prążków interferencyjnych.

Analiza statystyczna wyników badań obejmowała:

- analizę regresji stanowiącą podstawę do wyznaczenia matematycznego modelu obiektu badań,
- ocenę istotności współczynników regresji,
- ocenę adekwatności równania regresji.

Wyniki badań zestawione w tabelicy 24 posłużyły do wyznaczenia matematycznego modelu obiektu badań wg niżej podanego schematu [54]

$$1. (Oz) = \sum_{u=1}^m Z_u$$

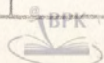
$$2. (kz) = \sum_{u=1}^m \check{x}_{ku} z_u \quad k = 1, 2$$

czyli :

TABLICA 24. Wyniki badań właściwych

Lp	Nr kolejny dośw.	Badane czynniki						Czynnik wynikowy Z = C							
		K o d		W a r t c ś c i				bez filtracji				z filtracją			
		\checkmark X_{1u}	\checkmark X_{2u}	X_{1u}		X_{2u}		$Z_{iu} = C_{iu}$			$\bar{u} = \bar{C}_u$	$Z_{iu} = C_{iu}$			$\bar{Z}_4 = \bar{C}_4$
				/	/	o	rd	1	2	3		1	2	3	
1	4	-1	-1	0,024	0,10	12	0,21	0,54	0,59	0,52	0,55	0,60	0,64	0,56	0,60
2	10	-1	+1	0,024	0,10	68	1,19	0,70	0,67	0,73	0,70	0,77	0,74	0,71	0,74
3	8	+1	-1	0,126	0,52	12	0,21	0,16	0,16	0,22	0,18	0,30	0,29	0,34	0,33
4	5	+1	+1	0,126	0,52	68	1,19	0,57	0,52	0,50	0,53	0,75	0,55	0,59	0,63
5	6	=	0	0,003	0,01	40	0,7	0,73	0,76	0,64	0,71	0,76	0,75	0,71	0,74
6	3	=	0	0,147	0,61	40	0,7	0,23	0,21	0,31	0,25	0,37	0,35	0,42	0,38
7	2	=	0	0,075	0,31	0	0	0,30	0,30	0,36	0,32	0,40	0,42	0,44	0,42
8	12	=	0	0,075	0,31	80	1,4	0,73	0,69	0,65	0,69	0,77	0,67	0,75	0,73
9	1	0	0	0,075	0,31	40	0,7	0,52	0,50	0,48	0,50	0,63	0,57	0,54	0,58
10	9	0	0	0,075	0,31	40	0,7	0,45	0,47	0,49	0,47	0,55	0,51	0,59	0,55
11	11	0	0	0,075	0,31	40	0,7	0,49	0,53	0,54	0,52	0,59	0,65	0,53	0,59
12	7	0	0	0,075	0,31	40	0,7	0,51	0,47	0,55	0,51	0,62	0,64	0,57	0,61
13	13	0	0	0,075	0,31	40	0,7	0,50	0,45	0,49	0,48	0,59	0,57	0,55	0,57

- 150 -



$$(1z) = \sum_{u=1}^m \check{x}_{1u} z_u$$

$$(2z) = \sum_{u=1}^m \check{x}_{2u} z_u$$

$$3. (kqz) = (12z) = \sum_{u=1}^m \check{x}_{1u} \check{x}_{2u} z_u$$

$$4. (kkz) = \sum_{u=1}^m \check{x}_{ku}^2 z_u \quad k = 1, 2$$

czyli:

$$(11z) = \sum_{u=1}^m \check{x}_{1u}^2 z_u$$

$$(22z) = \sum_{u=1}^m \check{x}_{2u}^2 z_u$$

$$5. \sum_{k=1}^i (kkz) = \sum_{k=1}^i \sum_{u=1}^r \check{x}_{ku}^2 z_u \quad k = 1, 2$$

czyli:

$$\sum_{k=1}^2 (kkz) = \sum_{k=1}^2 \sum_{u=1}^m \check{x}_{ku}^2 z_u =$$

$$= \sum_{u=1}^m \check{x}_{1u}^2 z_u + \sum_{u=1}^n \check{x}_{2u}^2 z_u$$

$$6. b_0 = D(oz) + E \sum_{k=1}^i (kkz)$$

$$7. b_k = e^{-1}(kz) \quad k = 1, 2$$

czyli

$$b_1 = e^{-1} (1z)$$

$$b_2 = e^{-1} (2z)$$

$$8. \quad b_{kq} = n_k^{-1} (kqz) \quad \text{czyli} \quad b_{12} = n_k^{-1} (12z)$$

$$9. \quad b_{kk} = (F - G)(kkz) + G \sum_{k=1}^i (kkz) + E(Oz) \quad k = 1, 2$$

czyli:

$$b_{11} = (F - G)(11z) + G \sum_{k=1}^2 (kkz) + E(Oz)$$

$$b_{22} = (F - G)(22z) + G \sum_{k=1}^2 kkz + E(Oz)$$

Wartości mnożników $D, E, e^{-1}, n_k^{-1}, F-G, G, F$ stosowanych do obliczania współczynników funkcji regresji zestawiono w tabelicy 25 [58].

TABLICA 25. Wartości mnożników stosowanych do obliczania funkcji regresji wg programów PS/DS-P: λ_m

i	D	E	e^{-1}	n_k^{-1}	F-G	G	P
2	0,200	-0,100	0,1250	0,2500	0,1250	0,0187	0,1437

A. Analiza statystyczna wyników badań właściwych bez stosowania filtracji częstości przestrzennych

Wartości pomocnicze $(Oz), (kz)$ itp. podane w punktach od 1 do 5 zestawiono w tabelicy 26.

TYTUŁ 26. Wartości pomocnicze do obliczania współczynników funkcji regresji
wg programu PS/DS-P: λ_m bez stosowania filtracji

Lp	Z_u	$\check{X}_{1u} \cdot Z_u$	$\check{X}_{2u} \cdot Z_u$	$\check{X}_{14} \cdot \check{X}_{2u} \cdot Z_u$ kod	$\check{X}_{1u}^2 \cdot Z_u$ kod	$\check{X}_{2u}^2 \cdot Z_u$ kod	Z_{0u}	$(Z_{0u} - \bar{Z}_{0u})^2$	\hat{Z}_u	$(Z_u - \hat{Z}_u)^2$
1	0,55	-0,55	-0,55	+1 +0,55	+1 +0,55	+1 +0,55	—	$Z_0 = \frac{\sum_{u=1}^{N_0} Z_{0u}}{N_0} = \frac{2,48}{5} = 0,496$	0,57	0,0004
2	0,70	-0,70	+0,70	-1 -0,70	+1 +0,70	+1 +0,70	—		0,72	0,0004
3	0,18	+0,18	-0,18	-1 -0,18	+1 +0,18	+1 +0,18	—		0,17	0,0001
4	0,53	+0,53	+0,53	+1 +0,53	+1 +0,53	+1 +0,53	—		0,53	0
5	0,71	-1	0	0 0	+2 +1,42	0 0	—		0,71	0
6	0,25	+0,53	0	0 0	+2 +0,50	0 0	—		0,29	0,0016
7	0,32	0	-0,45	0 0	0 0	+2 +0,64	—		0,31	0,0001
8	0,69	0	+0,98	0 0	0 0	+2 +1,38	—		0,68	0,0001
9	0,50	0	0	0 0	0 0	0 0	0,50	0,000016	0,50	0
10	0,47	0	0	0 0	0 0	0 0	0,47	0,000676	0,50	0,0009
11	0,52	0	0	0 0	0 0	0 0	0,52	0,000576	0,50	0,0004
12	0,51	0	0	0 0	0 0	0 0	0,51	0,000196	0,50	0,0001
13	0,48	0	0	0 0	0 0	0 0	0,48	0,000256	0,50	0,0004
$N=13$	$(0z) = 6,41$	$(1z) = -1,19$	$(2z) = 1,03$	$(12z) = +0,20$	$(11z) = +3,88$	$(22z) = +3,98$	$\sum_{u=1}^{N_0} Z_0 = 2,48$	$S_E = 0,001720$		$S_R = 0,0045$

Współczynnik funkcji regresji obliczono wg zależności od 6 do 9 uwzględniając podane wartości mnożników w tabeli 25.

$$b_0 = 0,200 \cdot 6,41 - 0,100 \cdot 7,86 = 0,496$$

$$b_0 = 0,496$$

$$b_1 = 0,125 \cdot -1,19 = -0,149$$

$$b_1 = -0,149$$

$$b_2 = 0,125 \cdot 1,03 = 0,129$$

$$b_2 = 0,129$$

$$b_{12} = 0,250 \cdot 0,20 = 0,050$$

$$b_{12} = 0,050$$

$$b_{11} = 0,125 \cdot 3,88 + 0,0187 \cdot 7,86 - 0,100 \cdot 6,41 = -0,009$$

$$b_{11} = -0,009$$

$$b_{22} = 0,125 \cdot 3,98 + 0,0187 \cdot 7,86 - 0,100 \cdot 6,41 = 0,003$$

$$b_{22} = 0,003$$

czyli funkcja regresji ma postać:

$$z = 0,496 - 0,149\check{x}_1 + 0,129\check{x}_2 - 0,009\check{x}_1^2 + 0,003\check{x}_2^2 + 0,050\check{x}_1\check{x}_2$$

Następnym etapem jest statystyczna ocena istotności współczynników funkcji regresji. Ocena istotności współczynników funkcji regresji przeprowadzono za pomocą testu t-Studenta. W tym celu wyznaczono:

1. Wariancję "między węzłową"

$$s_e^2 = \frac{S_E}{f_E} = \frac{0,00172}{4} = 0,00043$$

gdzie: $f_E = f_1 = n_0 - 1 = 5 - 1 = 4$

$$s_e^2 = 0,00043$$

2. Wariancję współczynników funkcji regresji

$$s^2(b_0) = D \cdot s_e^2 = 0,200 \cdot 0,00043 = 0,000086$$

$$s^2(b_0) = 0,000086$$

$$s^2(b_k) = s^2(b_1) = s^2(b_2) = e^{-1} \cdot s_e^2 = 0,125 \cdot 0,00043 = 0,00005395$$

$$s^2(k_1) = s^2(b_{12}) = n_k^{-1} \cdot s_e^2 = 0,2500 \cdot 0,00043 = 0,0001075$$

$$s^2(b_{12}) = 0,000108$$

$$s^2(b_{kk}) = s^2(b_{11}) = s^2(b_{22}) = F \cdot s_e^2 = 0,1437 \cdot 0,00043 = 0,000061791$$

$$s^2(b_{11}) = s^2(b_{22}) = 0,000062$$

3. Odchylenia standardowe:

$$s(b) = \sqrt{s^2(b)} \quad \text{czyli}$$

$$s(b_0) = 0,0093$$

$$s(b_1) = s(b_2) = 0,0073$$

$$s(b_{11}) = s(b_{22}) = 0,0079$$

4. Statystyki obliczeniowe t-Studenta

$$t_0 = t(b_0) = \frac{|b_0|}{s(b_0)} = \frac{0,496}{0,0093} = 53,3$$

$$t_0 = 53,3$$

$$t_1 = t(b_1) = \frac{|b_1|}{s(b_1)} = \frac{0,149}{0,0073} = 20,4$$

$$t_1 = 20,4$$

$$t_2 = t(b_2) = \frac{|b_2|}{s(b_2)} = \frac{0,129}{0,0073} = 17,7$$

$$t_2 = 17,7$$

$$t_{11} = t(b_{11}) = \frac{|b_{11}|}{s(b_{11})} = \frac{0,009}{0,0079} = 1,14$$

$$t_{11} = 1,14$$

$$t_{22} = t(b_{22}) = \frac{|b_{22}|}{s(b_{22})} = \frac{0,003}{0,0079} = 0,38$$

$$t_{22} = 0,38$$

$$t_{12} = t(b_{12}) = \frac{|b_{12}|}{s(b_{12})} = \frac{0,050}{0,0104} = 4,8$$

$$t_{12} = 4,8$$

Wartość tabelaryczna statystyki t-Studenta na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ oraz $f = f_E = 4$ wynosi 81 :

$$t_{\alpha, f} = t_{0,05;4} = 2,776$$

Wynika z tego, że

$$t_{11}, t_{22} < t_{0,05,4} = 2,776$$

$$t_0, t_1, t_2 > t_{0,05,4} = 2,776$$

tzn., że współczynniki funkcji regresji b_0, b_1, b_2 , są istotne, natomiast współczynniki b_{11}, b_{22} mają wpływ nieistotny i można je w dalszych rozważaniach pominąć, czyli funkcja regresji przyjąłaby wówczas postać:

$$Z = 0,496 - 0,149\check{x}_1 + 0,129\check{x}_2 + 0,050\check{x}_1\check{x}_2$$

Ostatnim etapem analizy statystycznej wyników badań właściwych bez stosowania filtracji częstości przestrzen-

nych jest ocena adekwatności funkcji regresji. Ocena adekwatności funkcji regresji przeprowadzono wykorzystując pomiary paralelne w centrum programu. W tym celu wyznaczono [54]:

średnią pomiarów w centrum programu wg zależności

$$\bar{z}_o = \frac{\sum_{u=1}^{m_o} z_{ou}}{n_o} = \frac{2,48}{5} = 0,496 \quad /tab. 26/$$

gdzie:

m_o - liczba pomiarów w centrum programu

u - kolejny pomiar w centrum programu

$$u = 1, 2, \dots, n_o$$

oraz

$$S_E = \sum_{u=1}^{m_o} (z_{ou} - \bar{z}_o)^2 = 0,001720 \quad /tab.26/$$

$$S_R = \sum_{u=1}^m (\hat{z}_u - z_u)^2 = 0,0045 \quad /tab.26/$$

gdzie:

z_u - wartości czynnika wynikowego z pomiarów

\hat{z}_u - wartości czynnika wynikowego obliczone z funkcji regresji

u - kolejny pomiar dla wszystkich układów programu $u = 1, 2, \dots, n$

$$S_{LF} = S_R - S_E = 0,0045 - 0,00172 = 0,00278$$

$$S_{LF} = 0,00278$$

$$f_1 = f_E = n_o - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$f_1 = 4$$

$$f_2 = f_{LF} = m - N_b - f_E = 13 - 4 - 4 = 5$$

gdzie:

m - ilość pomiarów zrealizowanych wg programu
PS/DS-P: λ_m

N_b - ilość współczynników funkcji regresji

$$f_2 = 5$$

Podstawą oceny adekwatności funkcji regresji był wynik testu F [10, 54].

$$F = \frac{S_{LF} \cdot f_E}{S_E \cdot f_{LF}} = \frac{0,00278 \cdot 4}{0,00172 \cdot 5} = 1,29$$

$$F = 1,29$$

Oceną adekwatności funkcji regresji przeprowadzono sprawdzając nierówność

$$F \leq F_{\alpha, f_2, f_1}$$

gdzie:

$$F_{\alpha, f_2, f_1} \text{ - jak w p. 2.3.1.}$$

Przyjmując $\alpha = 0,05$ oraz $f_1 = 4$, $f_2 = 5$ z [10] otrzymano

$$F_{\alpha, f_2, f_1} = F_{0,05, 5, 4} = 6,26$$

czyli

$$F_{\alpha, f_2, f_1} = F_{0,05, 5, 4} = 6,26 > F = 1,29$$

co upoważnia nas do stwierdzenia adekwatności funkcji regresji na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Ostatecznie funkcja regresji badanego obiektu po odkodowaniu wartości czynników badanych wg relacji:

$$\check{x}_1 = \frac{Ra - 0,075}{0,051} [\mu\text{m}] \text{ lub } \check{x}_1 = \frac{Rz - 0,31}{0,21} [\mu\text{m}]$$

$$\check{x}_2 = \frac{\beta - 40}{28} [^\circ] \text{ lub } \check{x}_2 = \frac{\beta - 0,7}{0,49} [\text{rd}]$$

oraz

$$Z = C$$

ma postać

$$C = 0,496 - 0,149 \left(\frac{R_a - 0,075}{0,051} \right) + 0,129 \left(\frac{\beta - 40}{28} \right) + \\ + 0,050 \left(\frac{R_a - 0,075}{0,051} \right) \left(\frac{\beta - 40}{28} \right)$$

gdzie: β [°]

Podobnie dla R_z :

$$C = 0,496 - 0,149 \left(\frac{R_z - 0,31}{0,21} \right) + 0,129 \left(\frac{\beta - 40}{28} \right) + \\ + 0,050 \left(\frac{R_z - 0,31}{0,21} \right) \left(\frac{\beta - 40}{28} \right)$$

gdzie: β [°]

oraz

$$C = 0,496 - 0,149 \left(\frac{R_a - 0,075}{0,051} \right) + 0,129 \left(\frac{\beta - 0,7}{0,49} \right) + \\ + 0,050 \left(\frac{R_a - 0,075}{0,051} \right) \left(\frac{\beta - 0,7}{0,49} \right)$$

gdzie: β [rd]

Podobnie dla R_z :

$$C = 0,496 - 0,149 \left(\frac{R_z - 0,31}{0,21} \right) + 0,129 \left(\frac{\beta - 0,7}{0,49} \right) + \\ + 0,050 \left(\frac{R_z - 0,31}{0,21} \right) \left(\frac{\beta - 0,7}{0,49} \right)$$

gdzie: β [rd]

Funkcje powyższe stanowią model matematyczny obiektu badań zrealizowanych w określonych warunkach badań doświadczalnych na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ bez stosowania filtracji częstości przestrzennych.

Po dokonaniu niezbędnych przekształceń model matematyczny obiektu badań można zapisać w prostszej postaci:

$$1. \quad C = 0,636 - 4,323 R_a + 0,002\beta + 0,035 R_a\beta \quad /2.01/$$

$$b_0 = 0,636$$

$$b_1 = -4,323$$

$$b_2 = 0,002$$

$$b_{12} = 0,035$$

$$2. \quad C = 0,637 - 1,050 R_z + 0,002\beta + 0,009 R_z\beta \quad /2.02/$$

$$b_0 = 0,637$$

$$b_1 = -1,050$$

$$b_2 = 0,002$$

$$b_{12} = 0,009$$

gdzie:

$$R_a, R_z \quad [\mu\text{m}] ; \quad \beta \quad [^\circ]$$

oraz odpowiednio:

$$1. \quad C = 0,636 - 4,351R_a + 0,113\beta + 2,001 R_a\beta \quad /2.03/$$

$$b_0 = 0,636$$

$$b_1 = -4,351$$

$$b_2 = 0,113$$

$$b_{12} = 2,001$$

$$2. \quad C = 0,637 - 1,050 R_z + 0,112\beta + 0,486 R_z\beta \quad /2.04/$$

$$b_0 = 0,637$$

$$b_1 = -1,050$$

$$b_2 = 0,112$$

$$b_{12} = 0,486$$

gdzie:

$$R_a, R_z \quad [\mu\text{m}], \quad \beta \quad [\text{rd}]$$

B. Analiza statystyczna wyników badań właściwych z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych

Na podstawie wyników badań przedstawionych w tabelicy 24 określono w sposób analogiczny jak poprzednio, model matematyczny obiektu badań przez:

- wyznaczenie współczynników funkcji regresji,
- ocenę istotności współczynników funkcji regresji,
- ocenę adekwatności funkcji regresji,
- odkodowanie wartości czynników badanych.

Wartości pomocnicze do obliczenia współczynników funkcji regresji wg programu PS/DS-P: λ_m z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych przedstawiono w tabelicy 27.

Odpowiednie współczynniki funkcji regresji wynoszą:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,200 \cdot 7,47 - 0,100 \cdot 9,14 &&= 0,580 \\ b_1 &= 0,125 \cdot (-0,89) &&= 0,111 \\ b_2 &= 0,125 \cdot 0,88 &&= 0,110 \\ b_{12} &= 0,250 \cdot 0,16 &&= 0,040 \\ b_{11} &= 0,125 \cdot 4,54 + 0,0187 \cdot 9,14 - 0,100 \cdot 7,47 = -0,008 \\ b_{22} &= 0,125 \cdot 4,60 + 0,0187 \cdot 9,14 - 0,100 \cdot 7,47 = -0,001 \end{aligned}$$

czyli funkcja regresji ma postać:

$$Z = 0,580 - 0,111\check{x}_1 + 0,110\check{x}_2 - 0,008\check{x}_1^2 - 0,001\check{x}_1^2 + 0,040\check{x}_1\check{x}_2$$

Analogicznie do poprzednich obliczeń, obliczenia powyższe uzupełniono statystyczną oceną istotności współczynników regresji obliczając:

1. Wariancję "międzywęzłową"

$$s_e^2 = \frac{S_E}{f_E} = \frac{0,0020}{4} = 0,0005$$

TABLICA 27. Wartości pomocnicze do obliczania współczynników funkcji regresji
wg programu PS/DS-P: m z zastosowaniem filtracji

Lp	Z _u	$\check{X}_{1u} \cdot Z_u$	$\check{X}_{2u} \cdot Z_u$	$\check{X}_{1u} \check{X}_{2u} Z_u$ kod	$\check{X}_{1u}^2 \cdot Z_u$ kod	$\check{X}_{2u}^2 \cdot Z_u$ kod	Z _{0u}	$(Z_{0u} - \bar{Z}_0)^2$	\hat{Z}_u	$(Z_u - \hat{Z}_u)^2$
1	0,60	-0,60	-0,60	+1 +0,60	+1 +0,60	+1 +0,60	—	$\bar{Z}_0 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} Z_{0u}}{n_0} = \frac{2,90}{5} = 0,58$	0,62	0,0004
2	0,74	-0,74	+0,74	-1 -0,74	+1 +0,74	+1 +0,74	—		0,76	0,0004
3	0,33	+0,33	-0,33	-1 -0,33	+1 +0,33	+1 +0,33	—		0,32	0,0001
4	0,63	+0,63	+0,63	+1 +0,63	+1 +0,63	+1 +0,63	—		0,62	0,0001
5	0,74	-1,05	0	0 0	+2 +1,48	0 0	—		0,74	0
6	0,38	+0,54	0	0 0	+2 +0,76	0 0	—		0,42	0,0016
7	0,42	0	-0,59	0 0	0 0	+2 +0,84	—		0,42	0
8	0,73	0	+1,03	0 0	0 0	+2 +1,46	—		0,74	0,0001
9	0,58	0	0	0 0	0 0	0 0	0,58	0	0	
10	0,55	0	0	0 0	0 0	0 0	0,55	0,0009	0,58	0,0009
11	0,59	0	0	0 0	0 0	0 0	0,59	0,0001	0,58	0,0001
12	0,61	0	0	0 0	0 0	0 0	0,61	0,0009	0,58	0,0009
13	0,57	0	0	0 0	0 0	0 0	0,57	0,0001	0,58	0,0001
N=13	(0z) = 7,47	(1z) = -0,89	(2z) = -0,88	(12z) = 0,16	(11z) = 4,54	(22z) = 4,60	$\sum_{u=1}^{n_0} Z_{0u} = 2,90$	S _E = 0,0020	S _R = 0,0047	

- 162 -

2. Wariancję współczynników funkcji regresji

$$\begin{aligned} s^2(b_0) &= 0,200 \cdot 0,0005 &= 0,0001 \\ s^2(b_1) &= s^2(b_2) = 0,125 \cdot 0,0005 &= 0,0000625 \\ s^2(b_{12}) &= 0,250 \cdot 0,0005 &= 0,000125 \\ s^2(b_{11}) &= s^2(b_{22}) = 0,1437 \cdot 0,0005 &= 0,0000718 \end{aligned}$$

3. Odchylenia standardowe

$$\begin{aligned} s(b_0) &= 0,01 \\ s(b_1) &= s(b_2) = 0,008 \\ s(b_{12}) &= 0,011 \\ s(b_{11}) &= s(b_{22}) = 0,0085 \end{aligned}$$

4. Statystyki obliczeniowe t-Studenta

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{0,580}{0,01} = 58 \\ t_1 &= \frac{0,111}{0,008} = 13,88 \\ t_2 &= \frac{0,110}{0,008} = 13,75 \\ t_{11} &= \frac{0,008}{0,008} = 1 \\ t_{22} &= \frac{0,001}{0,008} = 0,125 \\ t_{12} &= \frac{0,040}{0,008} = 5 \end{aligned}$$

Wartość tabelaryczna statystyki t-Studenta na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ oraz $f = f_E = 4$ wynosi [31]:

$$t_{\alpha, f} = t_{0,05,4} = 2,776$$

Wynika z tego, że

$$\begin{aligned} t_{11}, t_{22} &< t_{0,05,4} = 2,776 \\ t_0, t_1, t_2 &> t_{0,05,4} = 2,776 \end{aligned}$$

tzn., że współczynniki funkcji regresji b_0, b_1, b_2 są istotne, natomiast współczynniki b_{11}, b_{22} mają wpływ nieistotny i można je w dalszych rozważaniach pominąć, czyli funkcja regresji przyjęta wówczas postać:

$$Z = 0,580 - 0,111\check{x}_1 + 0,110\check{x}_2 + 0,040\check{x}_1\check{x}_2$$

Analizę statystyczną wyników badań właściwych z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych zakończono oceną adekwatności funkcji regresji wykorzystując pomiary paralelne w centrum programu. W tym celu obliczono: S_E i S_R , tablica 27. Należy jeszcze wyznaczyć:

$$S_{LF} = S_R - S_E = 0,0047 - 0,0020 = 0,0027$$

$$f_1 = f_E = m_0 - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$f_2 = f_{LF} = m - N_b - f_E = 13 - 4 - 4 = 5$$

co umożliwiło obliczenie:

$$F = \frac{S_{LF} \cdot f_E}{S_E \cdot f_{LF}} = \frac{0,0027 \cdot 4}{0,0020 \cdot 5} = 1,08$$

Ocenę adekwatności funkcji regresji przeprowadzono jak poprzednio sprawdzając nierówność:

$$F \leq F_{\alpha, f_2, f_1}$$

Przyjmując $\alpha = 0,05$ oraz $f_1 = 4, f_2 = 5$ wg [10] otrzymano:

$$F_{\alpha, f_2, f_1} = F_{0,05, 5, 4} = 6,26$$

czyli:

$$F_{\alpha, f_2, f_1} = F_{0,05, 5, 4} = 6,26 > F = 1,08$$

co upoważnia nas do stwierdzenia adekwatności funkcji regresji na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Po odkodowaniu wartości czynników badanych funkcja regresji badanego obiektu ma postać:

$$C = 0,580 - 0,111 \left(\frac{Ra - 0,075}{0,051} \right) + 0,110 \left(\frac{\beta - 40}{28} \right) + \\ + 0,040 \left(\frac{Ra - 0,075}{0,051} \right) \left(\frac{\beta - 40}{28} \right)$$

gdzie: $\beta [^\circ]$

Podobnie dla Rz

$$C = 0,580 - 0,111 \left(\frac{Rz - 0,31}{0,21} \right) + 0,110 \left(\frac{\beta - 40}{28} \right) + \\ + 0,040 \left(\frac{Rz - 0,31}{0,21} \right) \left(\frac{\beta - 40}{28} \right)$$

gdzie: $[\circ]$

oraz

$$C = 0,580 - 0,111 \left(\frac{Ra - 0,075}{0,051} \right) + 0,110 \left(\frac{\beta - 0,7}{0,49} \right) + \\ + 0,040 \left(\frac{Ra - 0,075}{0,051} \right) \left(\frac{\beta - 0,7}{0,49} \right)$$

gdzie: [rd]

Podobnie dla Rz

$$C = 0,580 - 0,111 \left(\frac{Rz - 0,31}{0,21} \right) + 0,110 \left(\frac{\beta - 0,7}{0,49} \right) + \\ + 0,040 \left(\frac{Rz - 0,31}{0,21} \right) \left(\frac{\beta - 0,7}{0,49} \right)$$

gdzie: [rd]

Funkcje powyższe stanowią model matematyczny obiektu badań zrealizowanych w określonych warunkach badań doświadczalnych na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych.

Po dokonaniu niezbędnych przekształceń model matematyczny obiektu badań zapisano w prostszej postaci:

$$1. \quad C = 0,670 - 3,296R_a + 0,002\beta + 0,028 R_a \beta \quad /2.05/$$

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,670 \\ b_1 &= -3,296 \\ b_2 &= 0,002 \\ b_{12} &= 0,028 \end{aligned}$$

$$2. \quad C = 0,671 - 0,801R_z + 0,002\beta + 0,007R_z \beta \quad /2.06/$$

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,671 \\ b_1 &= -0,801 \\ b_2 &= 0,002 \\ b_{12} &= 0,007 \end{aligned}$$

gdzie: R_a, R_z [μm]; β [$^\circ$]

oraz odpowiednio:

$$1. \quad C = 0,670 - 3,296R_a + 0,104\beta + 1,600R_a \beta \quad /2.07/$$

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,670 \\ b_1 &= -3,296 \\ b_2 &= 0,104 \\ b_{12} &= 1,600 \end{aligned}$$

$$2. \quad C = 0,671 - 0,801R_z + 0,104\beta + 0,389R_z \beta \quad /2.08/$$

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,671 \\ b_1 &= -0,801 \\ b_2 &= 0,104 \\ b_{12} &= 0,389 \end{aligned}$$

gdzie: R_a, R_z [μm]; β [rd]

Interpretacja współczynników regresji

Współczynnik b_0 określa wartość kontrastu prążków interferencyjnych dla zerowych wartości chropowatości badanych powierzchni i kąta padania wiązki przedmiotowej.

Współczynnik b_1 określa wpływ chropowatości badanych powierzchni na kontrast prążków interferencyjnych. Ujemna wartość współczynnika b_1 oznacza, że wzrost chropowatości powoduje spadek kontrastu prążków.

Współczynnik b_2 określa wpływ kąta padania wiązki przedmiotowej na kontrast prążków interferencyjnych. Wartość współczynnika b_2 jest dodatnia, tzn. ze wzrostem kąta padania wzrasta kontrast prążków.

Współczynnik b_{12} określa interakcje pomiędzy chropowatością oraz kątem padania. Dodatnia wartość współczynnika b_{12} oznacza wzrost kontrastu prążków ze wzrostem chropowatości i kąta podane jednocześnie.

Ponadto z porównania modelu matematycznego kontrastu prążków interferencyjnych bez stosowania filtracji /2.1./, /2.2./, /2.3./, /2.4./ z modelem matematycznym kontrastu z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych /2.5./, /2.6./, /2.7./, /2.8./ widać, że różnią się one zasadniczo wartościami współczynnika b_0 , b_1 , b_{12} . Wynika z tego, że stosując filtrację częstości można uzyskać wzrost kontrastu prążków przy czym wartość ta wzrasta ze wzrostem chropowatości badanych powierzchni, natomiast kąt padania przy stosowaniu filtracji nie wpływa na kontrast.

Obliczenia związane z badaniami własnymi przeprowadzono na kalkulatorze elektronicznym HUGIN memory.

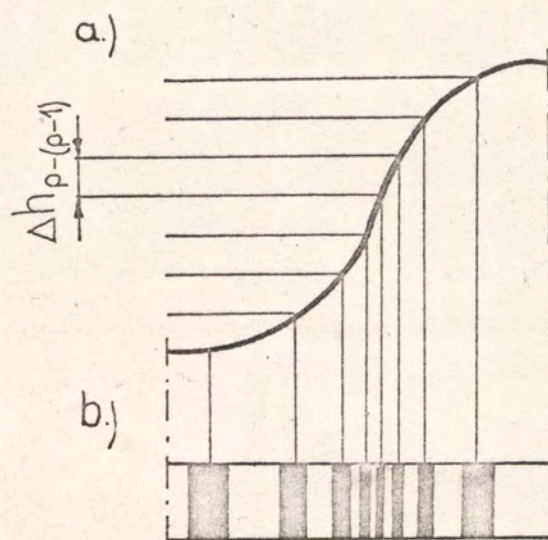
Minimalna wartość kontrastu wyczuwalna przez oko wg M. Pluty [53] zależy od konturów, kształtu, wielkości obserwowanych przedmiotów, rodzaju i sposobu oświetlenia oraz od tła, stanu akomodacji oka, rozwartości źrenicy i innych czynników. W przypadku dwóch pól świetlnych rozdzielonych pros-

tą linią, tzn. dla prostokątnego rozkładu intensywności, w normalnych warunkach dziennego oświetlenia przy szerokości źrenicy ok. 0,7 [mm] przyjmuje się, że minimalna wartość kontrastu wynosi 0,02, natomiast dla obszarów o dowolnych konturach wartość ta jest dużo większa [53]. Proponuje się aby przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn przyjąć wartość minimalnego kontrastu prążków interferencyjnych $C = 0,2$. Uzasadnienie przyjęcia takiej wartości związane jest z faktem, że rozkład intensywności w prążkach interferencyjnych zmienia się z kwadratem amplitudy /amplituda zmienia się sinusoidalnie/ oraz, że zdolność rozdzielcza naszego wzroku zmienia się z kontrastem prążków interferencyjnych [53]. Przy obserwacji wizualnej zdolność rozdzielcza zależy od wzroku, jak również od wielkości źrenicy wyjściowej oka. Zależność tę zbadał i przedstawił w postaci krzywych A. Arnulf. Z krzywych A. Arnulfa można odczytać, że maksymalną zdolność rozdzielczą uzyskuje się dla średnicy źrenicy oka $\omega = 0,7$ [mm]^{*/} [53]. Przyjmując odległość dobrego widzenia 250 [mm], $\lambda = 0,6$ [um] można wyznaczyć (opierając się na [53]) zdolność rozdzielczą dla oka ludzkiego, która wynosi ok. 0,3 [mm]^{**/}. Wielkość ta odnosi się dla siatki, którą można uważać jako dwa pola rozdzielone prostą linią, tzn. dla przypadku prostokątnego rozkładu intensywności jak również dla granicznej wartości kontrastu / $C = 1$ /. W przypadku prążków interferencyjnych, gdzie rozkład intensywności zmienia się z kwadratem amplitudy oraz kontrastu $C < 1$, wprowadza to pewne ograniczenia na zdolność rozdzielczą w prążkach interferencyjnych a tym samym na zakres pomiarowy interferometru holograficznego. Ponieważ praktycznie przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn w polu jednorodnym mamy nierównomierną odległość pomiędzy prą-

*/ Inna literatura podaje, że największa zdolność rozpoznawcza oka występuje przy średnicy źrenicy około 3 [mm]. Dla większych średnic pogorszenie warunków rozpoznawania spowodowane jest aberacją oka, natomiast dla mniejszej - zjawiskiem dyfrakcji [25].

**/ Inna literatura podaje, że zdolność rozdzielcza dla oka ludzkiego wynosi 0,07 [mm] [36].

kami, co wynika z faktu, że błędy kształtu zmieniają się wg zależności nieliniowych rys. 30 oraz istnieje również pewna możliwość zwiększenia odległości pomiędzy prążkami przez odsuwanie ekranu od hologramu, proponuje się przyjąć wartość odległości pomiędzy dwoma sąsiednimi prążkami dla całego przyjętego zakresu kontrastu prążków tzn. dla $C \geq 0,2$, $S_{p-(p-1)} \geq 1$ [mm]



Rys. 30. Nierównomierna zmiana odległości pomiędzy prążkami w polu jednorodnym
 a/ rozpatrywana powierzchnia
 b/ obraz prążków interferencyjnych

Aby obraz prążków interferencyjnych był dostatecznie wyraźny, wg [55] odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi prążkami jednakowej intensywności powinna być większa lub równa $S_{p-(p-1)} \geq 2$ [mm]. Wartość ta odnosi się do pola prążkowego, w którym odległość pomiędzy prążkami jest w zasadzie równomierna, co w efekcie jest porównywalne z wartością $S_{p-(p-1)} \geq 1$ [mm] dla pola jednorodnego. Wynika z tego, że średnią przeliczalną wartość odległości przy określaniu zakresu pomiarowego w pole jednorodnym można przyjąć około $\bar{S}_{p-p-1} = 2$ [mm].

Ponieważ zdolność rozdzielcza zależy od kontrastu prążków interferencyjnych oraz przy określaniu topografii błędów kształtu zależy nam na uzyskaniu maksymalnego kontrastu prążków dla określonych warunków, wydaje się celowe aby doprowadzić proces określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn na interferometrze holograficznym do procesu kontrolowanego tzn. do optymalizacji warunków określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn, maksymalizując kontrast prążków interferencyjnych. Zagadnienie to zostało zoptymalizowane w drugim etapie badań - badania właściwe p. 2.3.2.3. Jak zmienia się kontrast prążków interferencyjnych dla określonych chropowatości badanych powierzchni oraz kąta padania wiązki przedmiotowej przedstawiono na rys. 31. W sposób poglądowy zależności te ujmują wykresy rys. 32, 33. W rezultacie na podstawie matematycznego modelu kontrastu prążków interferencyjnych do celów użytecznych sporządzono tablice 28, 29, 30, 31, doboru wartości kontrastu prążków interferencyjnych dla określonych wartości chropowatości oraz kąta padania wiązki przedmiotowej. Tablice 28, 29 zostały sporządzone dla kontrastu prążków bez stosowania filtracji częstości przestrzennych, natomiast tablice 30, 31 z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych.

Zasada korzystania z tablic jest następująca:

dla danej chropowatości badanej powierzchni, która powiązana jest z klasą dokładności błędów kształtu [29] dobieramy taki kąt padania aby uzyskać z jednej strony optymalny kontrast prążków interferencyjnych ^{*/} a z drugiej strony aby minimalna odległość pomiędzy prążkami była większa lub równa $S_{p-(p-1)} \geq 1$ [mm]. Wartości kontrastu prążków interferencyj-

^{*/} Jeżeli dokładność kształtu maleje, wzrasta chropowatość powierzchni. Powoduje to obniżenie się kontrastu prążków. Aby temu zapobiec świadomie w sposób kierowany zwiększamy kontrast prążków przez zwiększenie kąta padania. Takie postępowanie pociąga za sobą obniżenie czułości co w przypadku małych dokładności kształtu tzn. dużych tolerancji nie ma istotnego wpływu na dokładność pomiarów.

a/
 $R_a = 0,003 \text{ } [\mu\text{m}]$

$\beta = 0^\circ$



b/
 $R_a = 0,126 \text{ } [\mu\text{m}]$

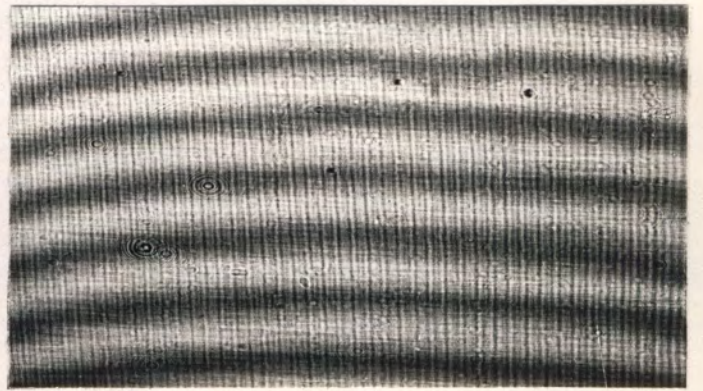


a/
 $R_a = 0,003 \text{ } [\mu\text{m}]$

$\beta = 60^\circ$



a/
 $R_a = 0,126 \text{ } [\mu\text{m}]$



Rys. 31. Zmiana kontrastu prążków interferencyjnych

- a/ $R_a = 0,003 \text{ } [\mu\text{m}]$, $\beta = 0^\circ$
- b/ $R_a = 0,126 \text{ } [\mu\text{m}]$, $\beta = 0^\circ$
- c/ $R_a = 0,003 \text{ } [\mu\text{m}]$, $\beta = 60^\circ$
- d/ $R_a = 0,126 \text{ } [\mu\text{m}]$, $\beta = 60^\circ$

nych zestawione w tablicach 28, 29, 30, 31, zostały obliczone na minikomputerze NOVA 1200 firmy DATA GENERAL. Język programowania BASIC. Ponadto z wystarczającą dokładnością do celów użytkowych w określonych warunkach, po dokonaniu pewnych uproszczeń, model matematyczny badanego obiektu podano w postaci użytkowych wzorów empirycznych na kontrast prążków interferencyjnych /2.09, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16/.

Przyjęcie minimalnej odległości pomiędzy prążkami $S_{p-(p-1)} = 1$ [mm], narzuca pewne warunki na zakres pomiarowy interferometru ponieważ na zakres pomiarowy wpływa wartość odpowiadająca zmianie odchyłki kształtu pomiędzy dwoma sąsiednimi prążkami jednakowej intensywności. Wartość ta zgodnie z zależnością /1.06/ związana jest ściśle z czułością interferometru, która jest wprost proporcjonalna do cosinusa kąta padania. Zakres pomiarowy interferometru można wyrazić ilością prążków interferencyjnych możliwych do odczytania /tzn. przy założonej minimalnej odległości pomiędzy prążkami $S_{p-(p-1)} = 1$ [mm] oraz minimalnym kontraście prążków $C = 0,2$ / na jednostkę długości, czyli jest to maksymalna możliwa do odczytania zmiana wartości wielkości mierzonej na jednostkę długości. Dla przykładu pokazano jak można uzyskać różne zakresy pomiarowe przy stałej odległości pomiędzy dwoma sąsiednimi prążkami.

$$L - \text{długość pomiarowa} = 100 \text{ [mm]}$$

$$\bar{S}_{p-(p-1)} - \text{średnia odległość pomiędzy prążkami} = 2 \text{ [mm]}$$

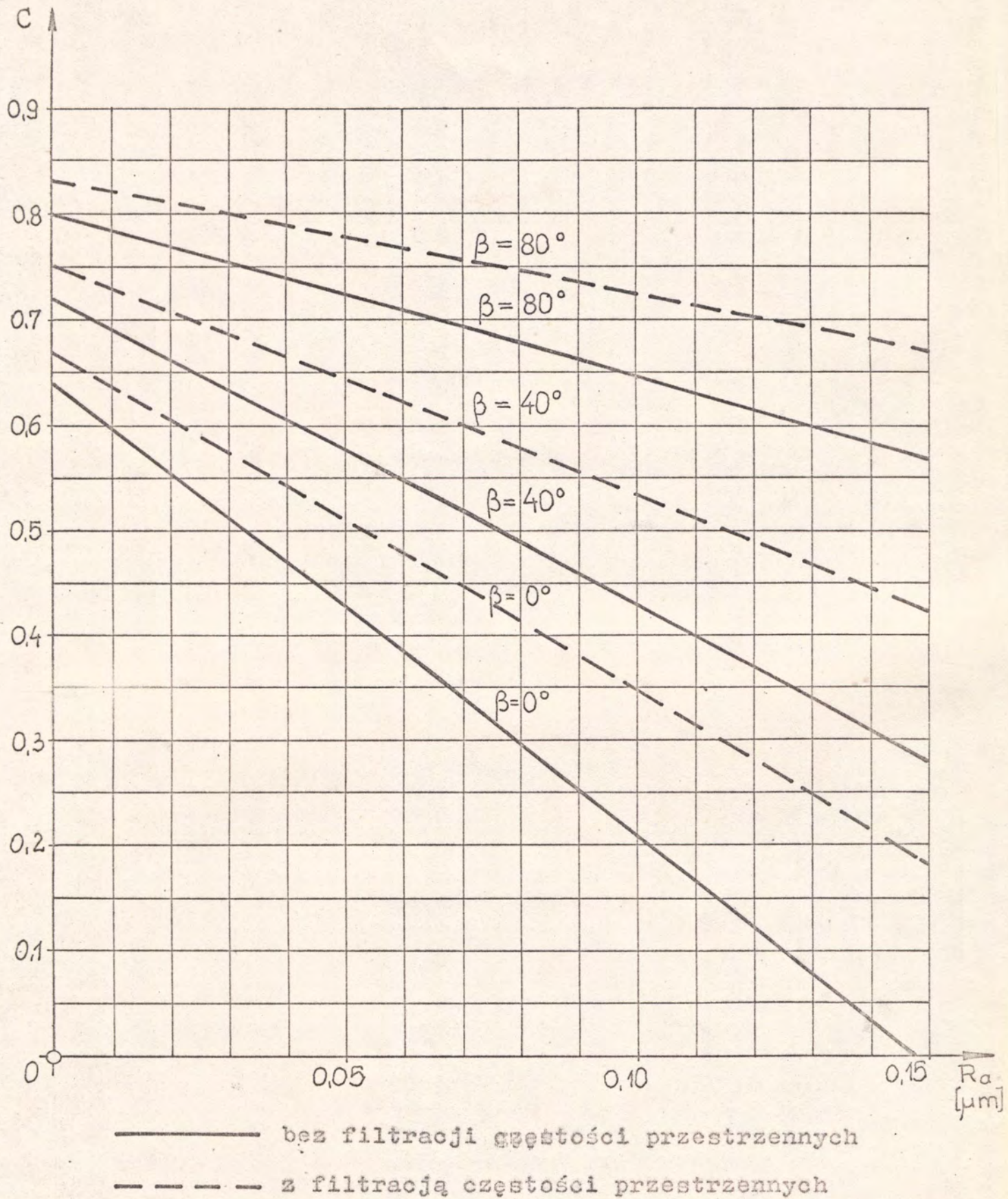
$$\lambda - \text{długość fali światła} = 0,63 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$\beta - \text{kąt padania} = 0^\circ - \Delta h_{p-p-1} \approx 0,3 \text{ [}\mu\text{m]}$$

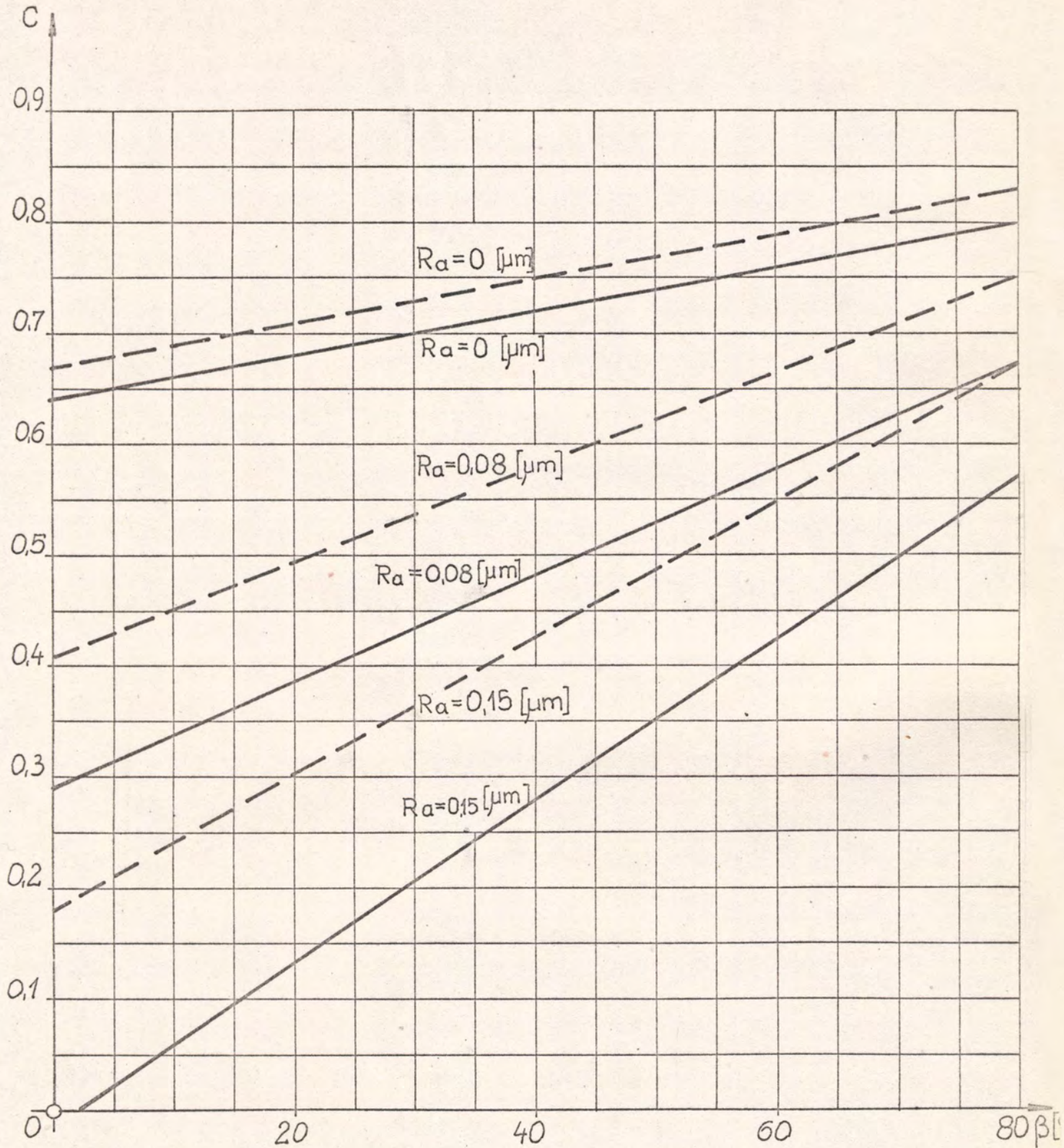
$$60^\circ - \Delta h_{p-p-1} \approx 0,6 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$80^\circ - \Delta h_{p-p-1} \approx 1,8 \text{ [}\mu\text{m]}$$

Średnia ilość prążków interferencyjnych na długości pomiarowej $L = 100$ [mm] wynosi:



Rys. 32. Wpływ chropowatości badanych powierzchni na kontrast prążków interferencyjnych



———— bez filtracji częstości przestrzennych
- - - - z filtracją częstości przestrzennych

Rys. 33. Wpływ kąta padania wiązki przedmiotowej na kontrast prążków interferencyjnych

TABLICA 28. Maksymalne wartości kontrastu prążków interferencyjnych przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn dla określonych wartości chropowatości R_a oraz kąta padania β bez stosowania filtracji częstości przestrzennych

β [°] \ R_a [μm]	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
0	0,64	0,59	0,55	0,51	0,46	0,42	0,38	0,33	0,29	0,25	0,20	0,16	0,12	0,07	0,03	-
5	0,65	0,60	0,56	0,52	0,48	0,44	0,40	0,36	0,31	0,27	0,23	0,19	0,15	0,11	0,07	0,02
10	0,66	0,62	0,58	0,54	0,50	0,46	0,42	0,38	0,34	0,30	0,26	0,22	0,18	0,14	0,10	0,06
15	0,67	0,63	0,59	0,55	0,51	0,48	0,44	0,40	0,36	0,32	0,29	0,25	0,21	0,17	0,13	0,10
20	0,68	0,64	0,60	0,57	0,53	0,49	0,46	0,42	0,39	0,33	0,31	0,28	0,24	0,21	0,17	0,13
25	0,69	0,65	0,62	0,58	0,55	0,51	0,48	0,44	0,41	0,38	0,34	0,31	0,27	0,24	0,20	0,17
30	0,70	0,66	0,63	0,60	0,57	0,53	0,50	0,47	0,43	0,40	0,37	0,34	0,30	0,27	0,24	0,21
35	0,71	0,68	0,64	0,61	0,58	0,55	0,52	0,49	0,46	0,43	0,40	0,37	0,33	0,30	0,27	0,24
40	0,72	0,69	0,66	0,63	0,60	0,57	0,54	0,51	0,48	0,45	0,42	0,39	0,37	0,34	0,31	0,28
45	0,73	0,70	0,67	0,64	0,62	0,59	0,56	0,53	0,51	0,48	0,45	0,42	0,40	0,37	0,34	0,31
50	0,74	0,71	0,68	0,66	0,63	0,61	0,58	0,56	0,53	0,50	0,48	0,45	0,43	0,40	0,38	0,35
55	0,75	0,72	0,70	0,67	0,65	0,63	0,60	0,58	0,55	0,53	0,51	0,48	0,46	0,43	0,41	0,39
60	0,76	0,73	0,71	0,69	0,67	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,53	0,51	0,49	0,47	0,44	0,42
65	0,77	0,75	0,73	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46
70	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,63	0,61	0,59	0,57	0,55	0,53	0,51	0,50
75	0,79	0,77	0,75	0,74	0,72	0,70	0,68	0,67	0,65	0,63	0,62	0,60	0,58	0,57	0,55	0,53
80	0,80	0,78	0,77	0,75	0,74	0,72	0,70	0,69	0,67	0,66	0,64	0,63	0,61	0,60	0,58	0,57
85	0,81	0,79	0,78	0,77	0,75	0,74	0,73	0,71	0,70	0,68	0,67	0,66	0,64	0,63	0,62	0,60

$$C = 0,64 - 4,32 R_a + 0,002 \beta + 0,04 R_a \beta \quad \beta [^\circ] \quad /2.09/$$

$$C = 0,64 - 4,35 R_a + 0,11 \beta + 2,00 R_a \beta \quad \beta [rd] \quad /2.10/$$

TABLICA 29. Maksymalne wartości kontrastu prążków interferencyjnych przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn dla określonych wartości chropowatości R_z oraz kąta padania β bez stosowania filtracji częstości przestrzennych

R_z [μm] \ β [°]	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
0	0,64	0,58	0,53	0,48	0,43	0,37	0,32	0,27	0,22	0,16	0,11	0,06	0,01	-	-	-
5	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04	-	-	-
10	0,66	0,61	0,56	0,51	0,47	0,42	0,37	0,32	0,27	0,22	0,18	0,13	0,08	0,03	-	-
15	0,67	0,62	0,58	0,53	0,48	0,44	0,39	0,35	0,30	0,26	0,21	0,16	0,12	0,07	0,02	-
20	0,68	0,63	0,59	0,55	0,50	0,46	0,42	0,37	0,33	0,29	0,24	0,20	0,15	0,11	0,07	0,02
25	0,69	0,65	0,60	0,56	0,52	0,48	0,44	0,40	0,36	0,32	0,27	0,23	0,19	0,15	0,11	0,07
30	0,70	0,66	0,62	0,58	0,51	0,50	0,46	0,42	0,38	0,35	0,31	0,27	0,23	0,19	0,15	0,11
35	0,71	0,67	0,63	0,60	0,56	0,52	0,49	0,45	0,41	0,38	0,34	0,30	0,27	0,23	0,19	0,16
40	0,72	0,68	0,65	0,61	0,58	0,54	0,51	0,48	0,44	0,41	0,37	0,34	0,30	0,27	0,23	0,20
45	0,73	0,69	0,66	0,63	0,60	0,57	0,53	0,50	0,47	0,44	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28	0,24
50	0,74	0,71	0,68	0,65	0,62	0,59	0,56	0,53	0,50	0,47	0,44	0,41	0,38	0,35	0,32	0,31
55	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64	0,61	0,58	0,55	0,52	0,50	0,47	0,44	0,41	0,39	0,36	0,33
60	0,76	0,73	0,71	0,68	0,66	0,63	0,60	0,58	0,55	0,53	0,50	0,48	0,45	0,43	0,40	0,37
65	0,77	0,74	0,72	0,70	0,67	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,53	0,51	0,49	0,46	0,44	0,42
70	0,78	0,76	0,74	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63	0,61	0,59	0,57	0,55	0,52	0,50	0,48	0,46
75	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,51
80	0,80	0,78	0,76	0,75	0,73	0,71	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,62	0,60	0,58	0,57	0,55
85	0,81	0,79	0,78	0,76	0,75	0,74	0,72	0,71	0,69	0,68	0,66	0,65	0,64	0,62	0,61	0,59

$$C = 0,64 - 1,05 R_z + 0,002 \beta + 0,01 R_z \beta \quad \beta [^\circ] \quad /2.11/$$

$$C = 0,64 - 1,05 R_z + 0,11 \beta + 0,49 R_z \beta \quad \beta [rd] \quad /2.12./$$

TABLICA 30. Maksymalne wartości kontrastu prążków interferencyjnych przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn dla określonych wartości chropowatości R_a oraz kąta padania β z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych

R_a [μm] β [°]	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
0	0,67	0,64	0,60	0,57	0,54	0,50	0,47	0,44	0,41	0,37	0,34	0,31	0,27	0,24	0,21	0,18
5	0,68	0,65	0,62	0,59	0,55	0,52	0,49	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,30	0,27	0,24	0,21
10	0,69	0,66	0,63	0,60	0,57	0,54	0,51	0,48	0,45	0,42	0,39	0,36	0,33	0,30	0,27	0,24
15	0,70	0,67	0,64	0,61	0,58	0,56	0,53	0,50	0,47	0,44	0,41	0,38	0,35	0,33	0,30	0,27
20	0,71	0,68	0,66	0,63	0,60	0,57	0,55	0,52	0,49	0,46	0,44	0,41	0,38	0,35	0,33	0,30
25	0,72	0,69	0,67	0,64	0,62	0,59	0,56	0,54	0,51	0,49	0,46	0,43	0,41	0,38	0,36	0,33
30	0,73	0,71	0,68	0,66	0,63	0,61	0,58	0,56	0,53	0,51	0,48	0,46	0,44	0,41	0,38	0,36
35	0,74	0,72	0,69	0,67	0,65	0,62	0,60	0,58	0,55	0,53	0,51	0,49	0,46	0,44	0,42	0,39
40	0,75	0,73	0,71	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,55	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45	0,42
45	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,47	0,45
50	0,77	0,75	0,73	0,71	0,69	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48
55	0,78	0,76	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,62	0,60	0,59	0,57	0,55	0,53	0,52
60	0,79	0,77	0,76	0,74	0,73	0,71	0,69	0,68	0,66	0,64	0,63	0,61	0,60	0,58	0,56	0,55
65	0,80	0,78	0,77	0,76	0,74	0,73	0,71	0,70	0,68	0,67	0,65	0,64	0,62	0,61	0,59	0,58
70	0,81	0,80	0,78	0,77	0,76	0,74	0,73	0,72	0,70	0,69	0,68	0,66	0,65	0,64	0,62	0,61
75	0,82	0,81	0,80	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,72	0,71	0,70	0,69	0,68	0,66	0,65	0,64
80	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,73	0,72	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67
85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70

$$C = 0,67 - 3,30 R_a + 0,002 \beta + 0,03 R_a \beta \quad \beta [^\circ] \quad /2.13/$$

$$C = 0,67 - 3,30 R_a + 0,10 \beta + 1,60 R_a \beta \quad \beta [rd] \quad /2.14/$$

TABLICA 31. Maksymalne wartości kontrastu prążków interferencyjnych przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn dla określonych wartości chropowatości R_z oraz kąta padania β z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych

R_z [μm] β [°]	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
0	0,67	0,63	0,59	0,55	0,51	0,47	0,43	0,39	0,35	0,31	0,27	0,23	0,19	0,15	0,11	0,07
5	0,68	0,64	0,60	0,57	0,53	0,49	0,45	0,41	0,37	0,34	0,30	0,26	0,22	0,18	0,14	0,11
10	0,69	0,66	0,62	0,58	0,54	0,51	0,47	0,44	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,22	0,18	0,14
15	0,70	0,67	0,63	0,60	0,56	0,53	0,49	0,46	0,42	0,39	0,35	0,32	0,28	0,25	0,21	0,18
20	0,71	0,68	0,64	0,61	0,58	0,55	0,51	0,48	0,45	0,41	0,38	0,35	0,31	0,28	0,25	0,22
25	0,72	0,69	0,66	0,63	0,60	0,56	0,53	0,50	0,47	0,44	0,41	0,38	0,35	0,31	0,28	0,25
30	0,73	0,70	0,67	0,64	0,61	0,58	0,55	0,52	0,49	0,47	0,44	0,41	0,38	0,35	0,32	0,29
35	0,74	0,71	0,69	0,66	0,63	0,60	0,57	0,55	0,52	0,49	0,46	0,44	0,41	0,38	0,35	0,32
40	0,75	0,72	0,70	0,67	0,65	0,62	0,59	0,57	0,54	0,52	0,49	0,46	0,44	0,41	0,39	0,36
45	0,76	0,74	0,71	0,69	0,66	0,64	0,62	0,59	0,57	0,54	0,52	0,49	0,47	0,45	0,42	0,40
50	0,77	0,75	0,73	0,70	0,68	0,66	0,64	0,61	0,59	0,57	0,55	0,52	0,50	0,48	0,46	0,43
55	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,61	0,59	0,57	0,55	0,53	0,51	0,49	0,47
60	0,79	0,77	0,75	0,73	0,71	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,51
65	0,80	0,78	0,77	0,75	0,73	0,71	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,61	0,59	0,58	0,56	0,54
70	0,81	0,80	0,78	0,76	0,75	0,73	0,72	0,70	0,69	0,67	0,66	0,64	0,62	0,61	0,59	0,58
75	0,82	0,81	0,79	0,78	0,77	0,75	0,74	0,72	0,71	0,70	0,68	0,67	0,66	0,64	0,63	0,61
80	0,83	0,82	0,81	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,73	0,72	0,71	0,70	0,69	0,67	0,66	0,65
85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70	0,69

$$C = 0,67 - 0,80 R_z + 0,002 \beta + 0,01 R_z \beta \quad \beta [^\circ] \quad /2.15/$$

$$C = 0,67 - 0,80 R_z + 0,10 \beta + 0,40 R_z \beta \quad \beta [\text{rad}] \quad /2.16/$$

C



$$\bar{n} = \frac{L}{S_{p-(p-1)}} = \frac{100}{2} = 50 \text{ [prąż. interf.]}$$

Średni zakres pomiarowy - $\overline{Z.P.} = \bar{n} \cdot h_{p-(p-1)}$, wynosi:

1. $\beta = 0^\circ - ZP = 15 \text{ } [\mu\text{m}] / 100 \text{ [mm]}$
2. $\beta = 60^\circ - ZP = 30 \text{ } [\mu\text{m}] / 100 \text{ [mm]}$
3. $\beta = 80^\circ - ZP = 90 \text{ } [\mu\text{m}] / 100 \text{ [mm]}$

Łatwo zauważyć, że zakres pomiarowy jest odwrotnie proporcjonalny do czułości interferometru /1.06/ rys. 1, tabl.1 i można go wyrazić prostą zależnością:

$$\overline{Z.P.} = \bar{n} \cdot h_{p-(p-1)} = \bar{n} \cdot \frac{\lambda}{2 \cos \beta} \quad /2.17/$$

Proponuje się aby jako warunek ograniczający zakres pomiarowy interferometru przyjąć maksymalną wartość kąta padania $\beta = 80^\circ$, ze wskazaniem w kierunku mniejszych kątów. Zwiększenie tej wartości powoduje rozszerzenie zakresu pomiarowego w górę. Zbyt duże kąty padania wprowadzają jednak duże zniekształcenia obrazu powierzchni rys. 11. /p.1.1.3/ co powoduje pewne zniekształcenia topografii powierzchni oraz utrudnia jasne i przejrzyste czytanie tych topografii. Dla celów użytkowych sporządzono tablicę 32 zakresu pomiarowego interferometru holograficznego.

TABLICA 32. Wartości średniego zakresu pomiarowego interferometru holograficznego:

$$\bar{S}_{p-(p-1)} = 2 \text{ [mm]}, \quad \lambda = 0,6328 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Kąt padania β°	0	25	50	70	76	80
czułość [$\mu\text{m}/\text{prążek}$]	0,316	0,349	0,492	0,925	1,308	1,823
Średni zakres pomiarowy [$\mu\text{m}/100 \text{ [mm]}$]	15	18	25	45	65	90

Z tablicy 32 widać, że maksymalny zakres pomiarowy interferometru do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn przy kącie padania 80° wynosi około $90 \text{ } [\mu\text{m}]/100 \text{ } [\text{mm}]$. Rozszerzanie tego zakresu przez zwiększanie kąta padania wydaje się niecelowe, ponieważ powyżej tego zakresu można stosować inne metody pomiarowe, np. metodę muarowych prążków, optyczne, optyczno-mechaniczne, elektryczne, pneumatyczne, itp. metody, ewentualnie jeżeli ze względów technicznych będzie to możliwe można zastosować lasery o większej długości emitowanej fali np.: laser molekularny na CO_2 $/\lambda = 10,6 \text{ } [\mu\text{m}]$ /. Przy wyborze zakresu pomiarowego, a tym samym przy doborze kąta padania należy kierować się rzeczywistymi wymaganiami stawianymi powierzchni pod względem dokładności kształtu [29]

2.4. Lokalizacja i interpretacja prążków interferencyjnych

Lokalizacja prążków interferencyjnych zależy od rodzaju źródła światła [5].

W przypadku punktowego spójnego źródła światła prążki powstają w dowolnym obszarze interferencyjnego pola a ich kontrast zależy od odpowiedniego natężenia obu wiązek światła biorących udział w procesie interferencji. Są to prążki interferencyjne niezlokalizowane [5, 25]

Zakładając teraz, że poprzednie spójne źródło światła jest rozciągłym źródłem tzn. posiada skończone wymiary zajmując pewien obszar wokół punktu 1,2 rys. 2. Źródło takie można uważać za zbiór niekoherentnych względem siebie punktowych źródeł, które tworzą niezlokalizowane interferencyjne pola. Całkowita intensywność interferencyjnego pola jest

równa sumie intensywności elementarnych interferencyjnych pól. Jeżeli różnica faz, fali świetlnej od różnych punktów rozciągniętego źródła jest niejednakowa, to elementarne interferencyjne obrazy są względem siebie przesunięte w wyniku czego kontrast prążków jest mniejszy w porównaniu z punktowym źródłem światła. Wzajemne przemieszczenie obrazów interferencyjnych pochodzących od rozciągniętego źródła światła rośnie ze wzrostem wymiarów źródła i zależy od położenia obszaru płaszczyzny interferencji. Widać z tego, że dla rozciągniętego źródła światła kontrast prążków interferencyjnych w niektórych obszarach interferencji może być taki sam jak w przypadku punkowego źródła światła co ma miejsce wówczas, gdy nastąpi korelacja elementarnych obrazów interferencyjnych powstających od elementarnych punktowych źródeł rozciągniętego źródła światła, natomiast w innych miejscach kontrast spada praktycznie do zera [5, 25]. Są to prążki interferencyjne zlokalizowane. Obszar lokalizacji prążków będzie się zmieniał ze zmianą wymiarów źródła światła. Przy małych wymiarach źródła obszar ten się powiększa, aż w granicznym przypadku otrzymamy obszar prążków interferencyjnych niezlokalizowanych.

W przypadku określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn metodą interferometrii holograficznej mamy punktowe źródło światła spójnego. Wiązka wzorcowa odtworzona z hologramu stanowi wiązkę punkowego spójnego światła, natomiast po odbiciu od powierzchni badanej wiązka przedmiotowa badana jest wiązką światła spójnego obciążona pewnymi szumami koherentnymi powstającymi od odbicia rozproszonego. Rozproszenie to jest tym większe im większa jest chropowatość badanych powierzchni. Mikronierówności badanej powierzchni zgodnie z zasadą Huygensa, są źródłem nowych fal. Fale te są od siebie niezależne i interferują ze sobą, w wyniku czego powstaje prążkowe pole interferencyjne o wysokich częstościach przestrzennych, które stanowi jak gdyby tło dla prążków pochodzących od skła-

dowej odbitej kierunkowo w wyniku czego następuje pogorszenie kontrastu prążków. Obraz interferencyjny - topografia błędów kształtu tworzy się od składowej odbitej kierunkowo, przeważającej energetycznie nad składową rozproszoną, czyli tworzy się obraz prążków interferencyjnych niezlokalizowanych, z pewnymi szumami koheretnymi w postaci prążków interferencyjnych o wysokich częstościach przestrzennych, które pochodzą od składowej rozproszonej. W granicznym przypadku, tzn. gdy chropowatość badanej powierzchni będzie duża /wówczas składowa odbita kierunkowo będzie mała w odniesieniu do składowej rozproszonej/ prążki niezlokalizowane pochodzące od składowej odbitej kierunkowo w ogóle nie powstaną, co potwierdziły wyniki badań /ze wzrostem chropowatości badanych powierzchni kontrast prążków interferencyjnych maleje/. W przypadku gdyby nastąpiła korelacja pomiędzy interferencyjnymi polami powstałymi od składowej rozproszonej, wówczas powstanie oprócz obrazu prążków interferencyjnych niezlokalizowanych, obraz prążków interferencyjnych zlokalizowanych. Ponieważ zagadnienie to wykracza poza zakres pracy jak również z uwagi na inny charakter informacji, którą można uzyskać z analizy takich interferogramów, np. naprężenia, przemieszczenia, temperatura itd. oraz ze względu na złożoność zagadnienia obraz prążków interferencyjnych zlokalizowanych nie będzie w dalszej części analizowany.

Pomiar błędów kształtu powierzchni części maszyn można prowadzić w jednorodnym lub w prążkowym polu interferencyjnym.

W przypadku, gdy w chwili wykonania hologramu dla powierzchni wzorcowej, w układzie interferometru nie nastąpiła żadna zmiana, to po dokładnym ustawieniu hologramu w miejsce, w którym odbywał się proces rejestracji uzyskuje się jednorodne pole interferencyjne rys. 34. Wynika z tego, że powierzchnia falowa odtworzona z hologramu jak również po-

wierzchnia falowa uformowana na powierzchni wzorcowej nakładających się wiązek światła są względem siebie równoległe tzn., że w każdym miejscu różnica drogi optycznej pomiędzy tymi powierzchniami jest taka sama.



Rys. 34. Jednorodne pole interferencyjne

Jasność pola jednorodnego w interferometrze holograficznym zależy od różnicy faz, wiązki zrekonstruowanej z hologramu i wiązki porównywanej. Zmianę tej różnicy można uzyskać przez poprzeczny przesuw hologramu lub przez przemieszczenie powierzchni wzorcowej w kierunku normalnym do powierzchni. Zastępując teraz wzorcową powierzchnię powierzchnią badaną, to na skutek zmiany drogi optycznej w wiązce przedmiotowej /spowodowanej błędami kształtu badanej powierzchni/, jednorodne pole interferencyjne zostanie zastąpione prążkami interferencyjnymi, które są miejscami geometrycznymi punktów odpowiadających tej samej różnicy długości drogi optycznej. Dwa sąsiednie prążki będą przechodziły przez obszar próbki, dla których zmiana odchyłki kształtu badanej powierzchni zgodnie z zależnością /1.06/ p.1.1.1.

będzie wynosiła

$$\Delta h_{p-(p-1)} = \frac{\lambda}{2 \cos \beta}$$

Dla stosowanego lasera He-Ne odpowiada to różnicy wysokości

$$\Delta h_{p-(p-1)j} \approx \frac{0,3164}{\cos} \quad [\mu\text{m}]$$

Całkowity błąd kształtu badanej powierzchni można wyznaczyć z ilości obserwowanych prążków interferencyjnych wg zależności:

$$\Delta K_j = n \cdot \Delta h_{p-(p-1)j} = n \cdot \frac{0,3164}{\cos \beta} \quad /2.18/$$

gdzie:

n - ilość prążków interferencyjnych jednakowej intensywności

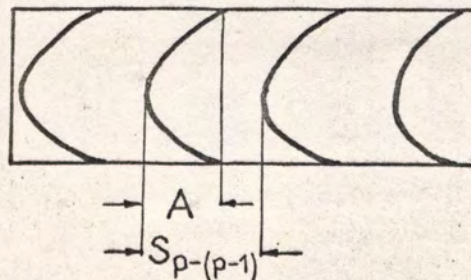
W przypadku, gdy w chwili wykonania hologramu dla powierzchni wzorcowej w układzie interferometru utworzono klin interferencyjny (nieznacznie obrócono powierzchnię wzorcową), to po dokładnym ustawieniu hologramu w miejscu, w którym odbywał się proces rejestracji uzyskuje się prążkowe pole interferencyjne rys. 35. Wynika z tego, że powierzchnia falowa odtworzona z hologramu, jak również powierzchnia falowa uformowana na powierzchni wzorcowej nakładających się wiązek światła tworzą ze sobą pewien kąt. W tym przypadku dwa sąsiednie prążki będą przebiegały przez obszar, dla których różnica faz pomiędzy interferującymi falami będzie wynosiła 2π . Zastępując teraz wzorcową powierzchnię, powierzchnią badaną, to na skutek zmiany drogi optycznej w wiązce przedmiotowej /spowodowanej błędami kształtu badanej powierzchni/, prążki interferencyjne zostaną lokalnie zniekształcone. Iloczyn stosunku odkształcenia prążka interferencyjnego A rys. 36 do odległości pomiędzy tymi

*/ indeks "j" oznacza, że pomiar błędów kształtu odbywa się w polu jednorodnym.

prążkami $S_{p-(p-1)}$ oraz stosunku połowy długości fali użytego promieniowania przez cosinus kąta padania daje błąd kształtu badanej powierzchni



Rys. 35. Prążkowe pole interferencyjne



Rys. 36. Schemat wyznaczania błędu kształtu w polu prążkowym

$$\Delta K_p^{**/} = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \cdot \frac{\lambda}{2 \cos \beta}$$

Dla stosowanego lasera He-Ne odpowiada to różnicy wysokości:

$$\Delta K_p = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \cdot \frac{0,3164}{\cos \beta} [\mu\text{m}] \quad /2.19./$$

**/ indeks "p" oznacza, że pomiar błędów kształtu odbywa się w polu prążkowym.

Dla zilustrowania tych dwóch sposobów pomiaru przeprowadzono pomiar błędów kształtu tej samej powierzchni, w jednorodnym polu interferencyjnym rys. 37, oraz prążkowym polu interferencyjnym rys. 38



Rys. 37. Pomiar błędów kształtu w jednorodnym polu interferencyjnym

Zgodnie z zależnością /2.18/ mamy

$$\Delta K_j = n \cdot \frac{0,3164}{\cos \beta} = 1,5 \cdot \frac{0,3164}{0,5} = 1 \text{ } [\mu\text{m}]$$

ponieważ:

$$\beta = 60^\circ; \quad n = 1,5 \quad /3 \text{ prążki jasne - ciemne/}$$



Rys. 38. Pomiar błędów kształtu w prążkowym polu interferencyjnym

Zgodnie z zależnością /2.19/ mamy:

$$\Delta K_p = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \cdot \frac{0,3164}{\cos \beta} = \frac{9}{6} \cdot \frac{0,3164}{0,5} = 1 \text{ } [\mu\text{m}]$$

ponieważ:

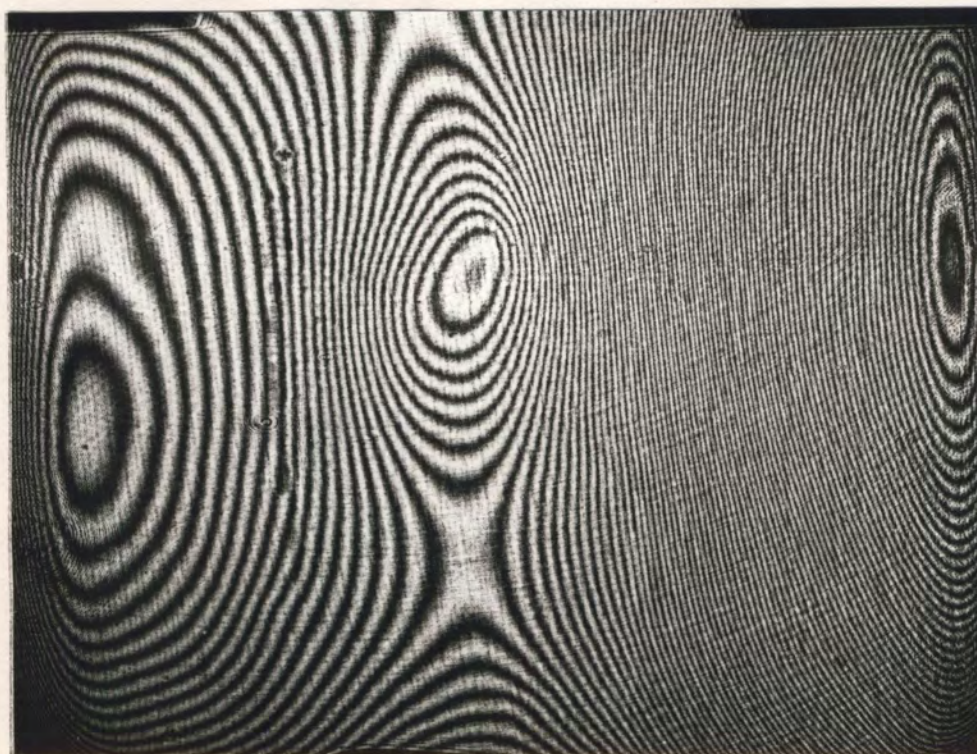
$$A = 9; \quad S_{p-(p-1)} = 6$$

Z przeprowadzonych pomiarów błędów kształtu tej samej powierzchni w polu jednorodnym rys. 37 oraz w polu prążkowym rys. 38 widać, że wyniki pomiarów są takie same. Wynika z tego, że te dwa sposoby interferencji są adekwatne ponieważ dają takie same wyniki.

Poza wyżej wymienionymi sposobami określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn istnieje jeszcze metoda, która umożliwia określanie błędów kształtu w przypadku braku powierzchni wzorcowej. W tym wypadku badana powierzchnia jest zarazem sama dla siebie wzorcem. Przy takich pomiarach tok postępowania jest następujący: wykonujemy hologram dla powierzchni badanej, następnie niczego nie zmieniając w interferometrze po przeprowadzonej obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej, hologram wstawiamy w miejsce, w którym znajdowała się płyta fotograficzna w czasie procesu rejestracji.

W wyniku interferencji fali odtworzonej z hologramu oraz fali uformowanej na powierzchni badanej otrzymujemy jednorodne pole interferencyjne. W przypadku idealnie wykonanej całej powierzchni badanej pod względem kształtu powinniśmy otrzymać jednorodne pole interferencyjne w każdym miejscu badanej powierzchni po jej przesunięciu lub obrocie względem normalnej do powierzchni. Wynika z tego, że w każdym miejscu powierzchnia falowa utworzona na powierzchni badanej pokrywa się z powierzchnią falową odtworzoną z hologramu. W innym przypadku pojawiają się prążki interferencyjne, co świadczy o niedokładności kształtu badanej powierzchni.

W celu ilościowego określenia błędów kształtu badanej powierzchni należy najpierw z uzyskanej topografii błędów kształtu badanej powierzchni określić jej ukształtowanie czyli stwierdzić czy jest ona wypukła, wklęsła czy nieregularna. W przypadku pomiaru w polu jednorodnym najwygodniej jest przy pomocy dodatkowego mechanizmu wywrzeć od strony zewnętrznej próbki niewielki nacisk. Jeżeli badana powierzchnia jest wypukła to po wywarceniu małego nacisku ilość zamkniętych prążków interferencyjnych powiększa się. Oznacza to, że na skutek nacisku różnica drogi optycznej pomiędzy powierzchnią wzorcową odtworzoną z hologramu i powierzchnią badaną powiększa się, co przejawia się w postaci dodatkowych prążków interferencyjnych. Jeżeli natomiast badana powierzchnia jest wklęsła, to po wywarceniu nacisku ilość zamkniętych prążków interferencyjnych zmniejsza się aż do zupełnego ich zaniku. Wynika z tego, że na skutek nacisku różnica drogi optycznej pomiędzy powierzchnią wzorcową i badaną maleje. Dla przykładu przedstawiono na rys. (39) topografię błędów kształtu badanej powierzchni, na której można zauważyć trzy centra zamkniętych prążków interferencyjnych, które mają świadczyć o wypukłości, wklęsłości albo nieregularności badanej powierzchni.



Rys. 39. Topografia błędów kształtu badanej powierzchni płaskiej

Na rys. 40 dla tej samej próbki widać cztery kolejne fazy ukształtowania prążków interferencyjnych pod wpływem wzrastającego nacisku. Można zauważyć, że ilość środkowych zamkniętych prążków interferencyjnych pod wpływem nacisku maleje - wynika z tego, że w tym miejscu powierzchnia jest wklęsła, natomiast ilość dwóch pozostałych skrajnych zamkniętych prążków wzrasta - wynika z tego, że w tych miejscach powierzchnia jest wypukła. Ponadto miejsca wypukłe pod wpływem wzrastającego nacisku łączą się ze sobą, natomiast miejsca wklęsłe nie, co widać na rys. 40. W ten sposób możemy zidentyfikować każdą dowolną topografię błędów kształtu badanej powierzchni.

W przypadku pomiaru w polu prążkowym powierzchnia jest wypukła jeżeli prążki są łukowe, zwrócone krzywizną do krawędzi klina interferencyjnego, natomiast wklęsła jeżeli prąż-

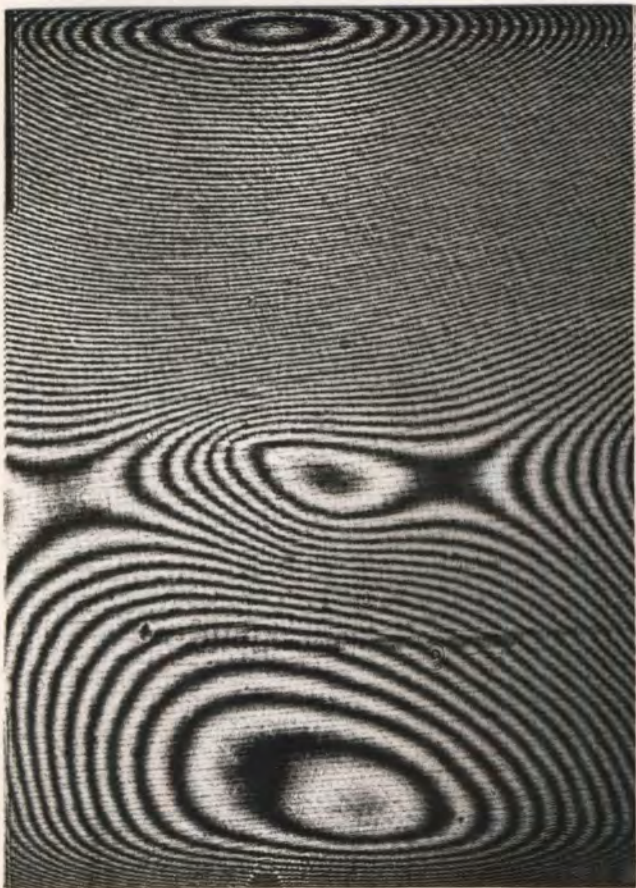
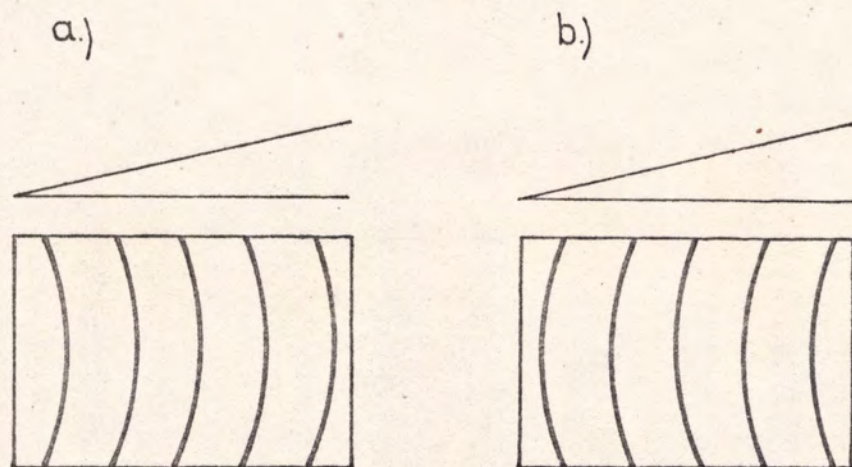


Fig. 40. Hóme ukartel kowady na kórn interferencyjnych zewzrostem docisku

żki zwrócone są krzywizną od krawędzi klina interferencyjnego rys. 41.



Rys. 41. Ukształtowanie prążków interferencyjnych w przypadku powierzchni:

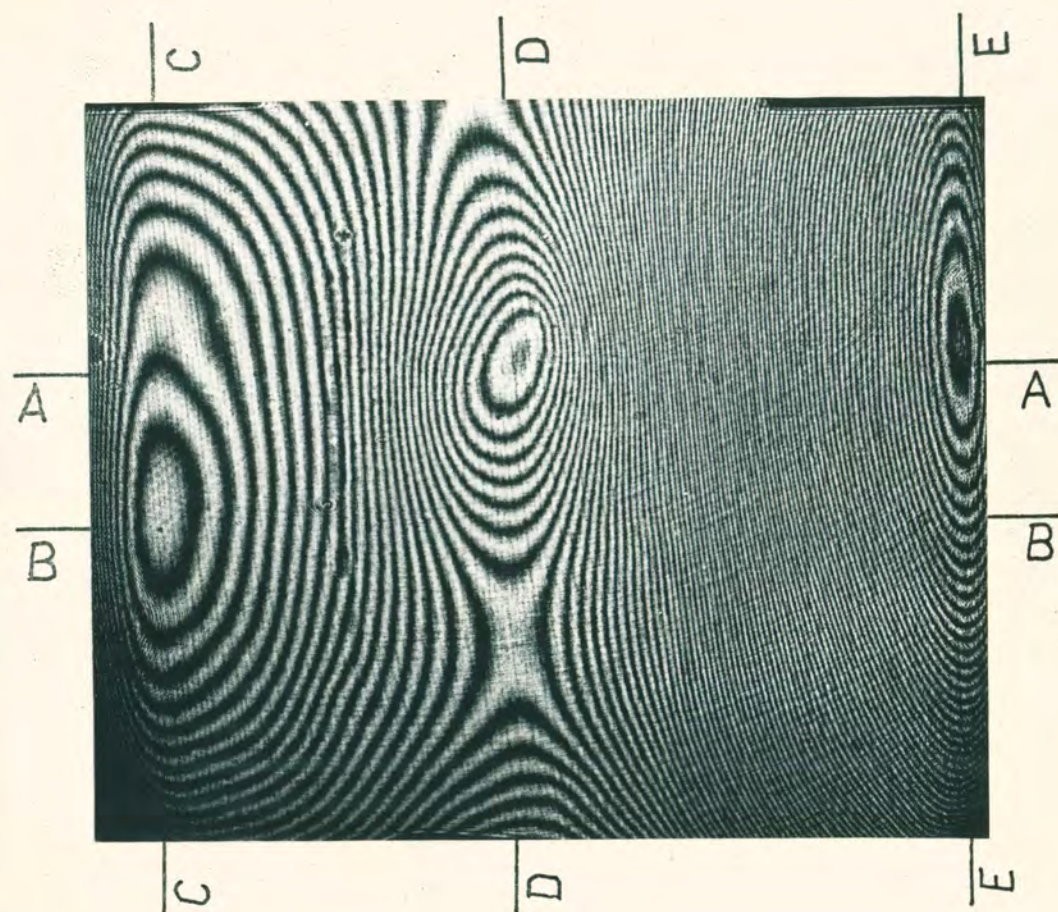
a/ wypukłej

b/ wklęsłej

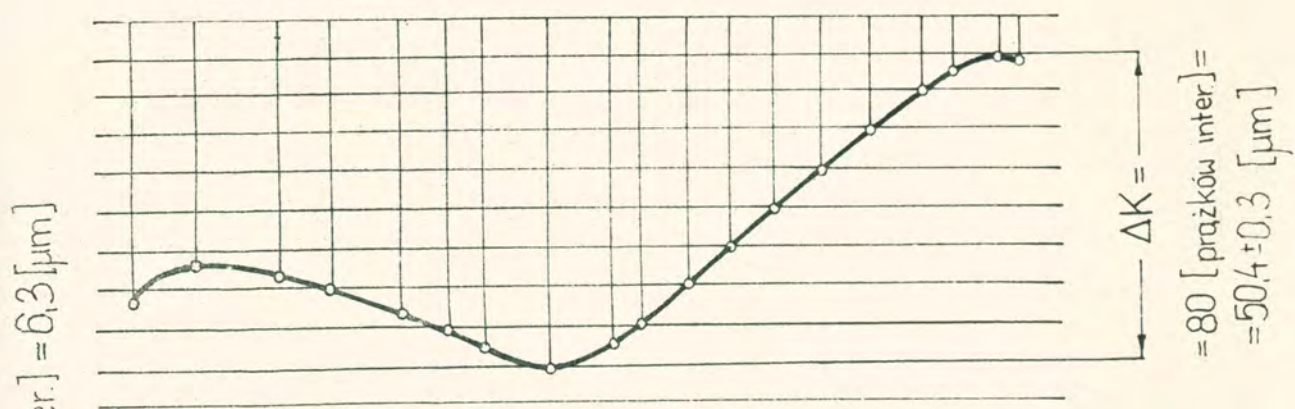
W tym celu wytwarzamy klin interferencyjny, w wyniku czego otrzymamy pole prążkowe. Otrzymane prążki w zależności od kształtu powierzchni będą zwrócone krzywizną na przemian do lub od krawędzi klina interferencyjnego.

W celu poglądowego przedstawienia ukształtowania błędów kształtu powierzchni na rys. 42 wykonano przekroje w różnych miejscach, w płaszczyźnie normalnej do powierzchni. Przykładu tego nie należy traktować jako pomiaru lecz jako poglądowy sposób przedstawienia ukształtowania błędów kształtu powierzchni. Topografia błędów kształtu dla tej powierzchni nie jest wyznaczona zgodnie z PN-68/M-02137^{*/}, tzn. powierzchnia wzorcowa w tym przypadku nie pokrywa się z powierzchnią odniesienia. Oznacza to, że nie został spełniony wa-

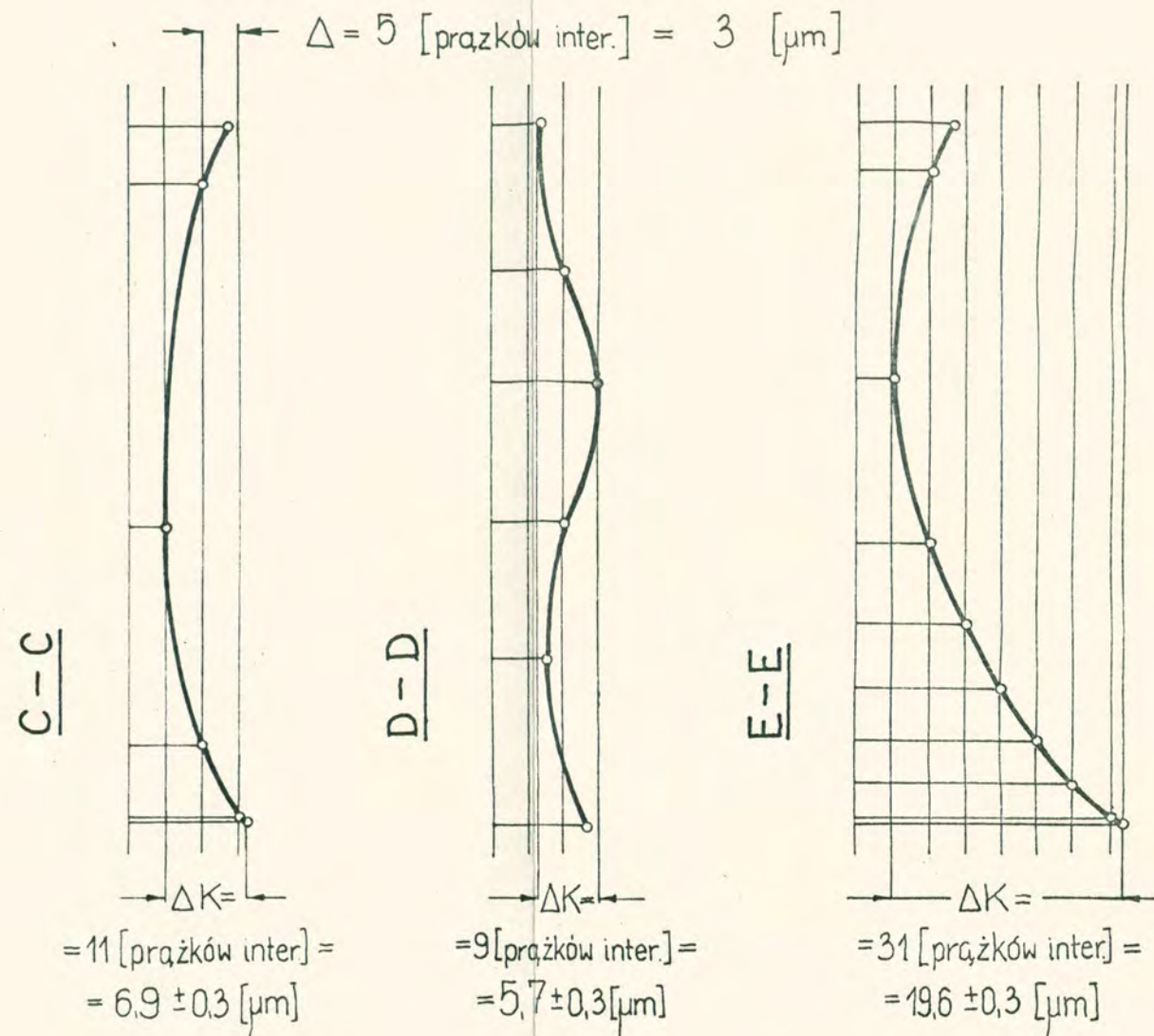
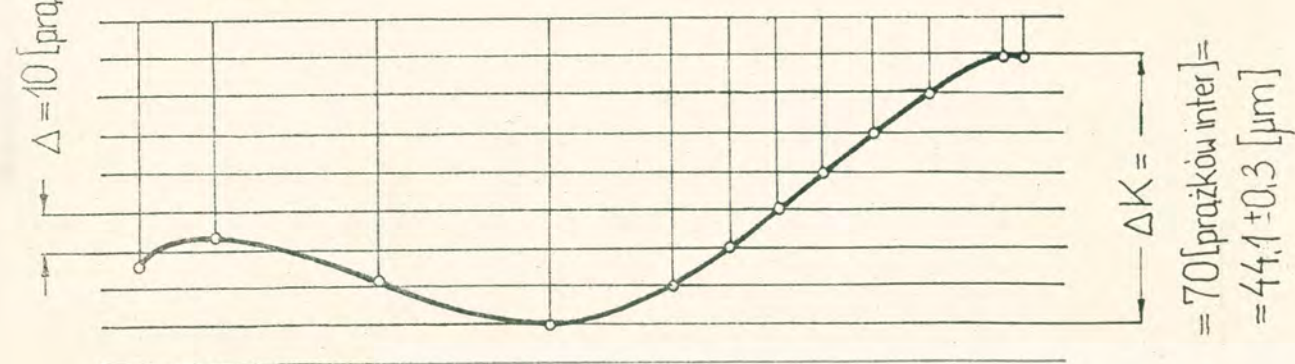
^{*/} PN-68/M-02137 - Odchyłki kształtu i położenia. Nazwy i określenia.



A-A



B-B



$\Delta K_{\text{max.}} = 80$ [prążków inter.] = 50.4 ± 0.3 [μm]

Rys. 42 Ukształtowanie błędów kształtu powierzchni dla różnych przekrojów topograficznej mapy błędów kształtu z rys. 39

$R_a = 0,050$ [μm]

$\beta = 60$ [°]

$C = 0,64$

runek najlepszego dopasowania - minimalna ilość prążków interferencyjnych. Pomiarów błędów kształtu zgodnie z PN-68/M-02137 zostały przedstawione w p. 2.6.

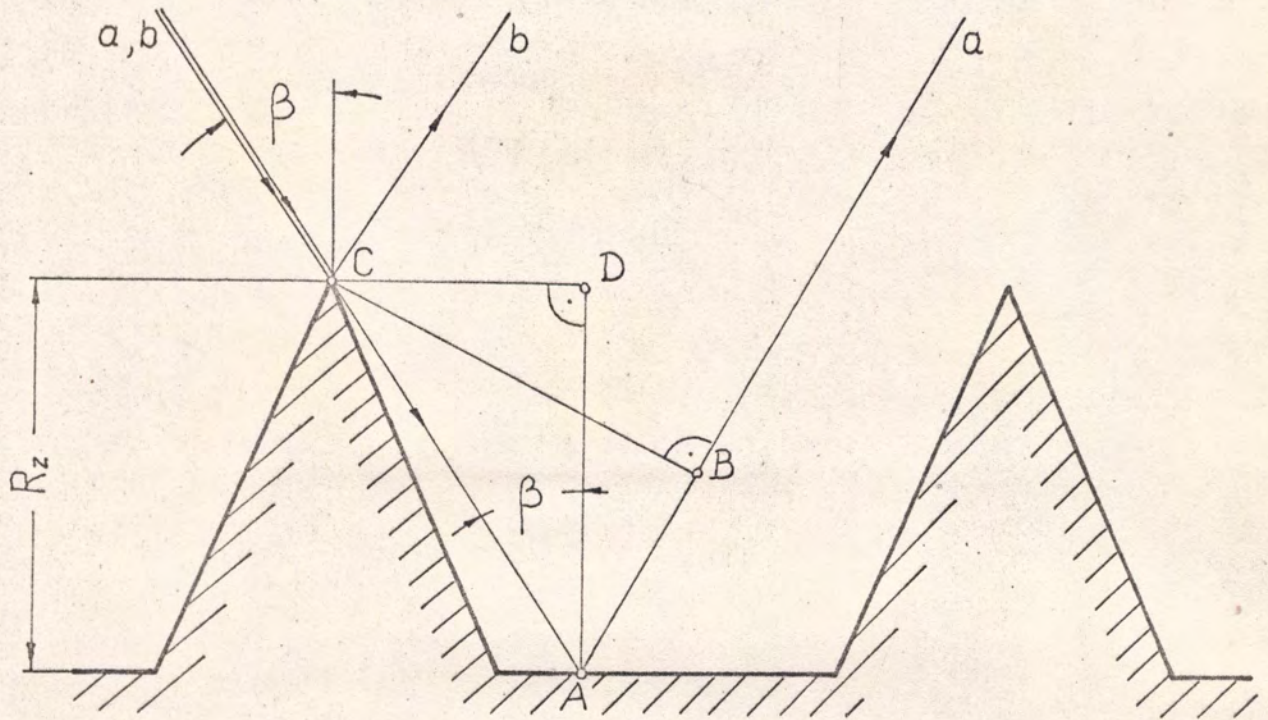
2.5. Wpływ chropowatości oraz kąta padania na kontrast prążków interferencyjnych

Badania wykazały, że na kontrast prążków interferencyjnych mają wpływ: chropowatość badanych powierzchni oraz kąt padania wiązki przedmiotowej. Rozproszenie światła na powierzchni chropowatej związanej jest ze zjawiskiem dyfrakcji światła na mikronierównościach badanych powierzchni. Po przeanalizowaniu literatury okazało się, że problemowi temu niewiele poświęcono do tej pory uwagi. Podjęta próba rozwiązania tego problemu stanowi jedynie niepełne wyjaśnienie zagadnieniom. Z uwagi na ważność zagadnienia uważa się, że problem ten powinien stanowić przedmiot dalszych dokładnych i szczegółowych badań.

Ponieważ chropowatość badanej powierzchni posiada stochastyczny rozkład wysokości mikronierówności, dlatego światło rozproszone na tych mikronierównościach doznaje również stochastycznych przesunięć fazowych. Ponieważ fazy zmieniają się z dużą częstotliwością przestrzenną od punktu do punktu, to w wyniku interferencji tego światła w płaszczyźnie interferogramu powstaje pole prążkowe o wysokich częstościach. Pole to nie zawiera informacji o błędach kształtu badanej powierzchni lecz o jej chropowatości, w wyniku czego kontrast prążków pochodzących od składowej odbitej kierunkowo maleje.

W celu objaśnienia wpływu kąta padania oraz chropowatości badanej powierzchni na udział składowej rozproszonej w procesie interferencji, a tym samym na kontrast prążków

przyjęto następujący model mikronierówności badanej powierzchni -
chni rys. 43.



Rys. 43. Model mikronierówności badanej powierzchni
a- promień odbity, b- promień rozproszony

Różnica dróg optycznych promienia a i b /rys. 43/ padają-
cych na badaną powierzchnię wynosi:

$$\Delta = AC + AB$$

Po dokonaniu niezbędnych przekształceń oraz uwzględnieniu
chropowatości R_z i kąta padania β otrzymujemy:

$$\Delta = 2 R_z \cos \beta \quad /2.20/$$

Ponieważ różnica faz pomiędzy promieniami a i b wynosi

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \quad /2.21/$$

otrzymujemy:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi R_z \cos\beta}{\lambda} \quad /2.22/$$

Z zależności /2.22/ widać jak zmienia się różnica faz światła rozproszonego w zależności od zmiany kąta padania oraz wysokości chropowatości badanej powierzchni. Łatwo zauważyć, że zmiana fazy przyjmuje wartość zerową w przypadku:

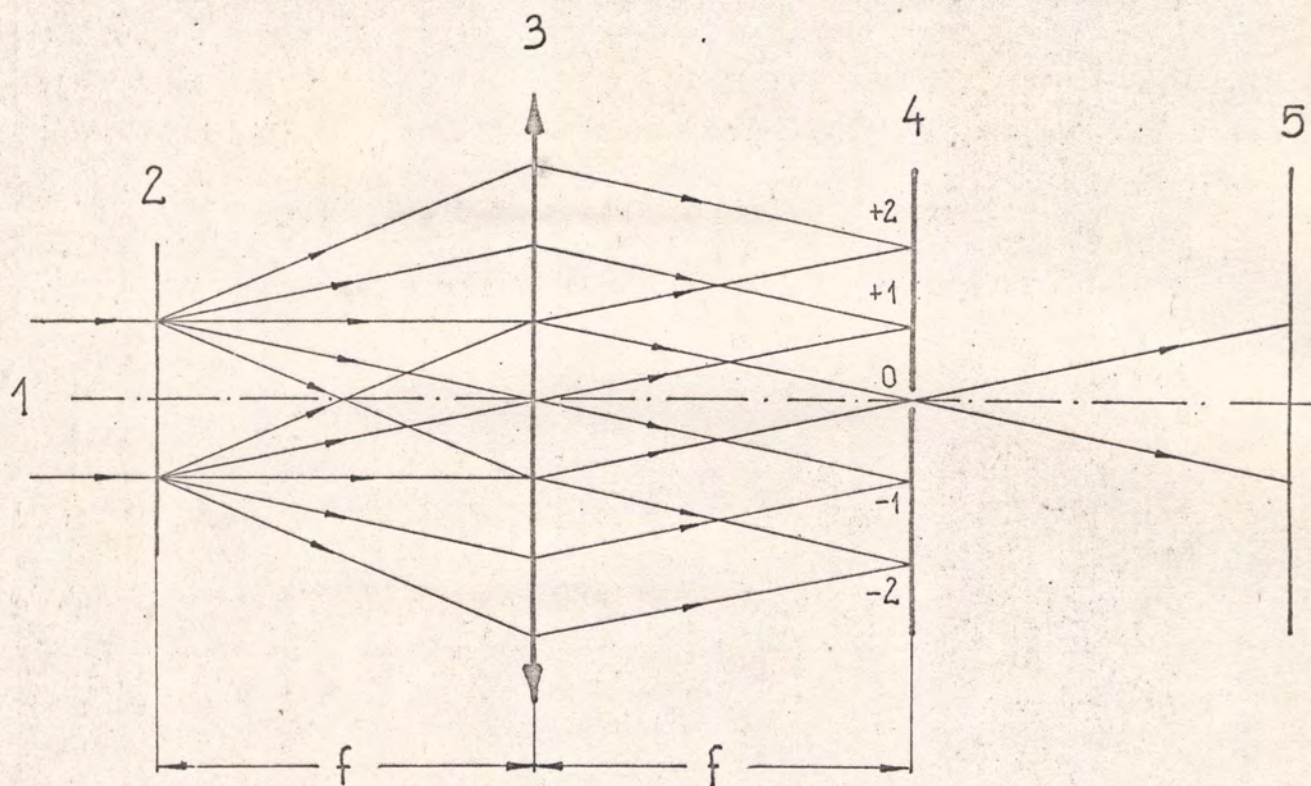
1. $R_z = 0$
- lub 2. $\beta = 90^\circ$

czyli zmieniając kąt padania od $0 + 90^\circ$ /przy $R_z = \text{const}$ / zmniejszamy różnicę faz światła rozproszonego, a tym samym zmniejsza się udział składowej rozproszonej w interferencji co powoduje powiększanie się kontrastu prążków interferencyjnych. Również przy stałym kącie padania, zmniejszając chropowatość badanej powierzchni zmniejszamy różnicę faz światła rozproszonego.

Jak wykazano w p. 1.1.1. czułość metody zmniejsza się w zależności od kąta padania wiązki przedmiotowej. W związku z tym zwiększanie kontrastu prążków interferencyjnych przez zwiększanie kąta padania w przypadku powierzchni o dużej chropowatości odbywa się kosztem obniżania czułości metody. Kontrast prążków można zwiększyć nie zmieniając kąta padania a tym samym czułości metody w przypadku powierzchni o dużej chropowatości przez zastosowanie filtracji częstości przestrzennych, która polega na częściowym wyeliminowaniu wpływu światła rozproszonego.

Podstawy teoretyczne filtracji częstości przestrzennych zostały dokładnie omówione w wielu publikacjach i wydawnictwach książkowych zarówno krajowych [15, 25, 52], jak również zagranicznych [9, 13 33], dlatego szczegółowa analiza tego zagadnienia nie wydaje się celowa.

Zgodnie z teorią Abbe'go odwzorowania optycznego, każdą badaną powierzchnię pod względem optycznym można traktować jako zbiór siatek dyfrakcyjnych o różnych częstościach przestrzennych. Jeżeli powierzchnię taką oświetlimy falą płaską to fala ugina się pod różnymi kątami na elementarnych siatkach dyfrakcyjnych, z których składa się ta powierzchnia rys. 44.

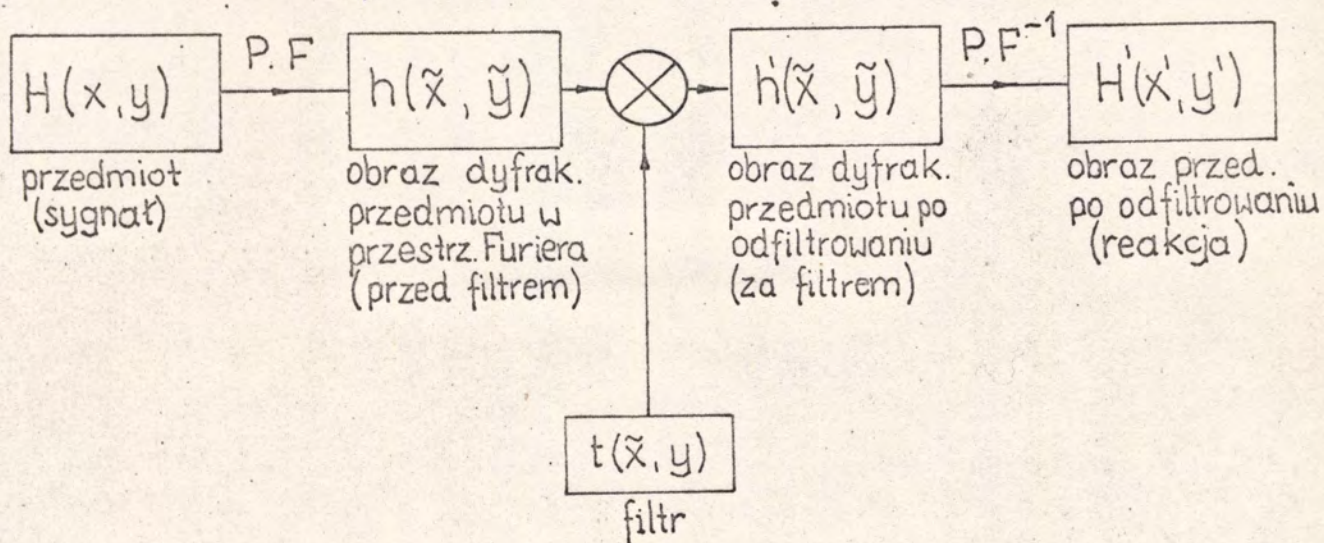


Rys. 44. Ugięcie światła na badanej powierzchni
1 - fala płaska, 2 - przedmiot, 3 - obiektyw, 4 - płaszczyzna ogniskowa obiektywu /filtr/, 5 - płaszczyzna obrazowa obserwacji /ekran/

Jeżeli płaszczyzna przedmiotowa pokrywa się z płaszczyzną ogniskową obiektywu rys. 44 to w płaszczyźnie ogniskowej po przeciwnej stronie obiektywu powstanie obraz, w którym rozkład amplitud światła jest transformatą Furiera, tzn. w płaszczyźnie tej powstanie obraz dyfrakcyjny - widmo częstości przestrzennej badanej powierzchni rys. 44. Z uwagi na różne częstości przestrzenne rozpatrywanej powierzchni w płaszczyźnie Furiera następuje rozdział poszczególnych rzędów dyfrakcyjnych badanej powierzchni. Informacje o błędach kształtu są zawarte w niskich częstościach przestrzennych przenoszonych do dalszej analizy /światło ugięte odpowiadające tym częstościom jest zlokalizowane w pobliżu osi układu optycznego, płaszczyzna 4 /rys. 44/ - przy wyznaczaniu topografii błędów kształtu powierzchni z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych przyjęto maksymalną częstość $0,5 \text{ [mm]}^{-1}$.

Światło przenoszące informacje o mikronierównościach ugina się pod większymi kątami, dlatego w płaszczyźnie Furiera rys. 44 leży w większej odległości od osi układu optycznego. Wynika z tego, że w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu, płaszczyzna 4 /rys. 44/ następuje rozdzielenie informacji o błędach kształtu i chropowatości badanych powierzchni. Właściwość tą można wykorzystać do poprawy kontrastu prążków interferencyjnych przez zatrzymanie światła rozproszonego, a przepuszczenie do dalszej analizy światła o niskich częstościach przestrzennych, zawierających informacje o błędach kształtu badanej powierzchni. Realizuje się to przez wstawienie w płaszczyznę ogniskową obiektywu odpowiedniego filtra częstości przestrzennych rys. 44, którym w naszym przypadku jest diafragma z odpowiednio dobranym otworem.

Liniovą filtrację częstości przestrzennych można zrealizować wg schematu rys. 45.



$$H(x,y) \xrightarrow{\text{P.F.}} h(\tilde{x}, \tilde{y}) \rightarrow \otimes \rightarrow h'(\tilde{x}, \tilde{y}) = h(\tilde{x}, \tilde{y}) t(\tilde{x}, \tilde{y}) \xrightarrow{\text{P.F.}^{-1}} H'(x', y') = H(x, y) \otimes T(x, y)$$

$$t(\tilde{x}, \tilde{y}) \xrightarrow{\text{P.F.}^{-1}} T(x, y)$$

gdzie:

- \tilde{x}, \tilde{y} - częstotści dla x, y w przestrzeni Furiera
- $t(\tilde{x}, \tilde{y})$ - funkcja przenoszenia filtra opisującego sposób obcinania poszczególnych częstotści przestrzennych

Rys. 45. Schemat realizacji optycznej filtracji częstotści przestrzennych

Jeżeli filtr częstotści przestrzennych opisujący funkcję $t(\tilde{x}, \tilde{y})$ jest w postaci otworu o średnicy D , to taki filtr przepuści tylko te częstotści przestrzenne, dla których spekniona jest zależność:

$$\frac{1}{P} = \sqrt{\tilde{x}_1^2 + \tilde{y}_1^2} \leq \frac{D}{2\lambda f} \quad /2.23/$$

gdzie:

- $\frac{1}{P}$ - częstotć przestrzenna

f - ogniskowa soczewki
 λ - długość fali światła

Wszystkie częstotliwości przestrzenne, dla których

$$\frac{1}{P} < \frac{D}{2\lambda f}$$

zostaną przeniesione do obrazu, natomiast

$$\frac{1}{P} > \frac{D}{2\lambda f}$$

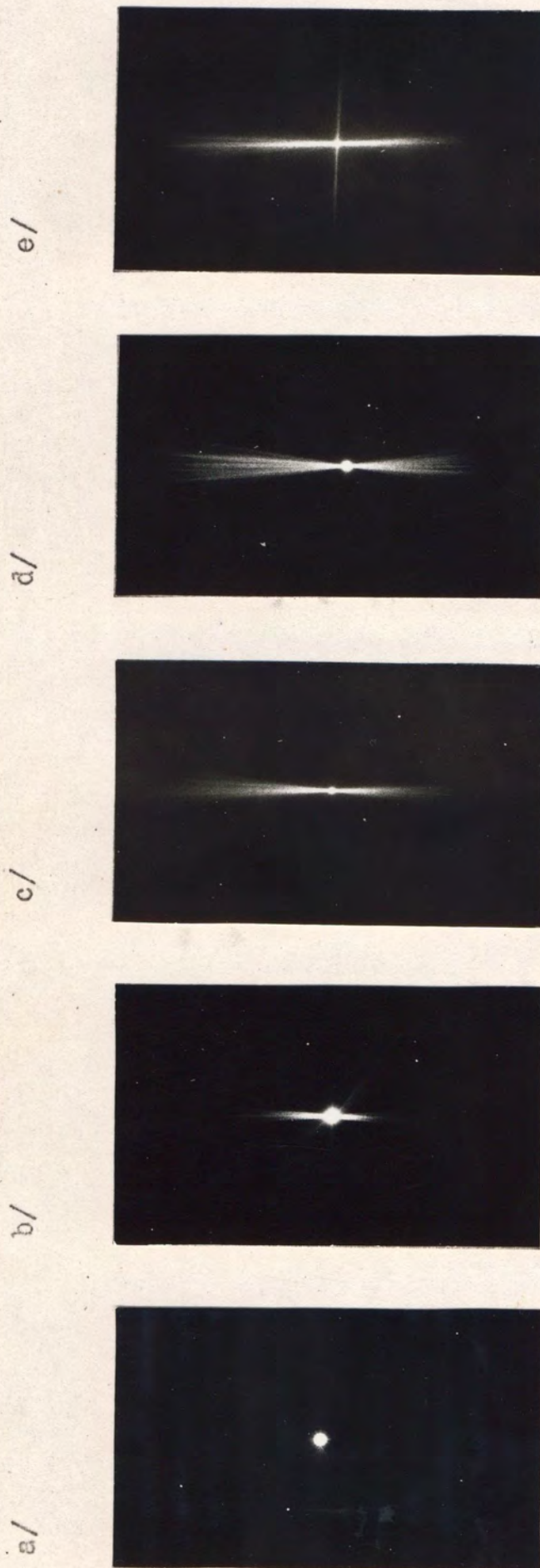
zostaną zatrzymane przez filtr.

Widma częstotliwości przestrzennych wiązki przedmiotowej badanych powierzchni przedstawiono na rys. 46.

W przypadku filtracji wiązki przedmiotowej o wysokich częstotliwościach przestrzennych, powstających na skutek rozproszenia światła na mikronierównościach podczas określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn filtrację przeprowadzono wg schematu rys. 47.

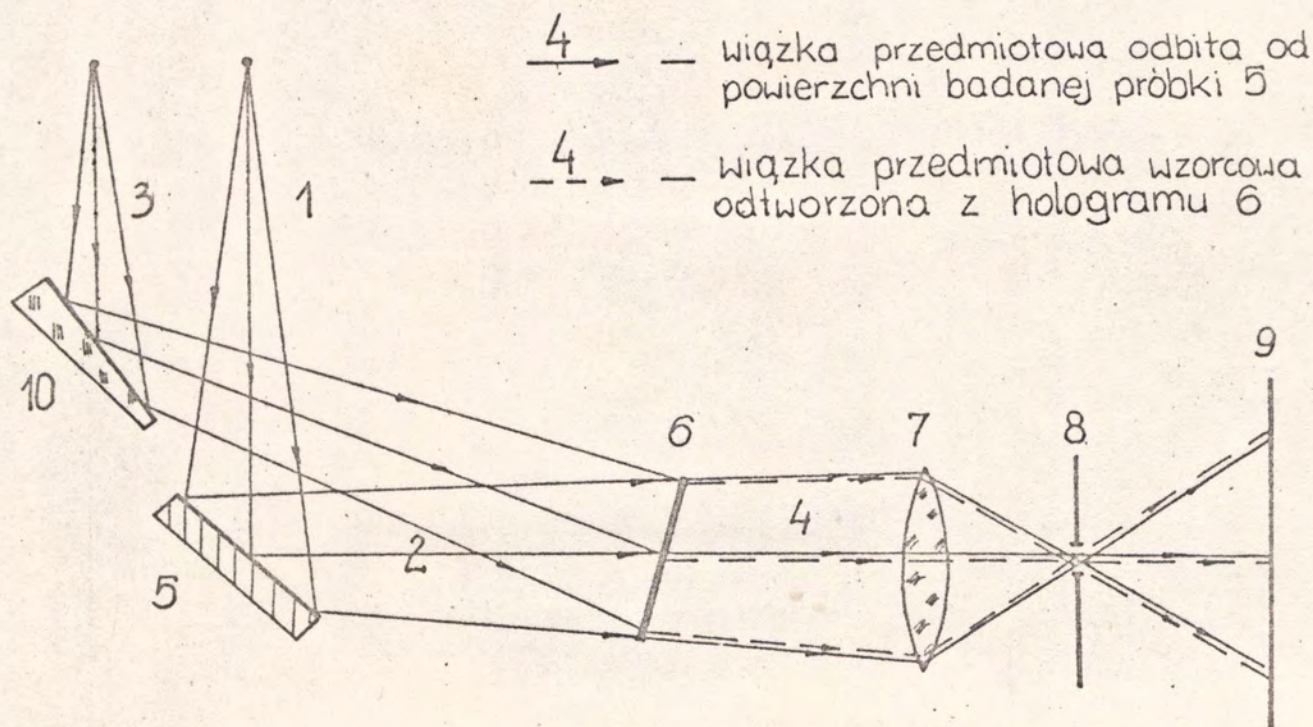
Jeżeli płaszczyzna przedmiotowa nie pokrywa się z płaszczyzną ogniskową obiektywu, spowoduje to inne rozdzielanie rzędów dyfrakcyjnych w płaszczyźnie Furiera rys. 44. W wyniku tego otrzymuje się zmodyfikowane widmo częstotliwości przestrzennych. W związku z tym średnica otworu filtrującego powinna być inaczej dobrana - najlepiej eksperymentalnie. W naszym przypadku jako filtra używano diafragmy o zmiennym otworze.

Średnicę otworu filtrującego dobrano eksperymentalnie w ten sposób aby zachować wszystkie prążki interferencyjne, które zawierają informację o błędach kształtu badanej powierzchni oraz aby uzyskać optymalny kontrast prążków. Filtrację prowadzono za pomocą układu optycznego zestawionego z podzespołów wchodzących w skład produkowanych w PZO zestawów holograficznych - ZHL i ZHB, rys. 48.



Rys. 46. Widma częstotliwości przestrzennych wiązki przedmiotowej badanych powierzchni

a/ $R_a = 0,003$ [μm]	b/ $R_a = 0,024$ [μm]
c/ $R_a = 0,075$ [μm]	d/ $R_a = 0,126$ [μm]
	e/ $R_a = 0,147$ [μm]



Rys. 47. Filtracja częstości przestrzennych wiązki przedmiotowej: 1 - wiązka oświetlająca badaną powierzchnię, 2 - wiązka przedmiotowa, 3 - wiązka odniesienia, 4 - wiązka przedmiotowa badana i odtworzona z hologramu wiązka przedmiotowa wzorcowa, 5 - próbka, 6 - hologram, 7 - obiektyw, 8 - filtr z otworem o średnicy D , 9 - płaszczyzna obrazowa - obserwacji /ekran/, 10 - lustro $T = 100\%$



Rys. 48. Widok układu do filtracji częstości przestrzennych

2.6. Pomiar błędów kształtu wybranych powierzchni

Na zakończenie badań własnych przeprowadzono pomiary błędów kształtu wybranych powierzchni na laboratoryjnym modelu interferometru holograficznego.

Pomiary zgodnie z zakresem pracy przeprowadzono dla:

- powierzchni płaskich
- wycinków zewnętrznych powierzchni walcowych
- wycinków wewnętrznych powierzchni walcowych

Pomiary błędów kształtu powierzchni płaskich przeprowadzono w jednorodnym polu interferencyjnym rys. 49, oraz w prążkowym polu interferencyjnym rys. 50.

Pomiary wycinków powierzchni walcowych przeprowadzono w prążkowym polu interferencyjnym. Ze względu na mały kontrast prążków interferencyjnych podczas pomiarów wycinków wewnętrznych powierzchni walcowych, jak również ze względu na podobne ukształtowanie tych prążków oraz wartości błędów kształtu, interferogramów tych powierzchni nie przedstawiono.

Mały kontrast prążków interferencyjnych wynikał z braku powierzchni wzorcowej, którą zastąpiono jedną z powierzchni badanych. Spowodowało to, że kontrast prążków interferencyjnych obniżył się.

Chropowatość zewnętrznych powierzchni walcowych wynosiła $R_a = 0,07$ [μm], natomiast chropowatość wewnętrznych powierzchni walcowych wynosiła $R_a = 0,08$ [μm], co spowodowało, że kontrast prążków tych powierzchni był jeszcze niższy. Pomiary przeprowadzono dla wszystkich powierzchni przy kącie padania 60° , bez stosowania filtracji częstotliwości przestrzennych.

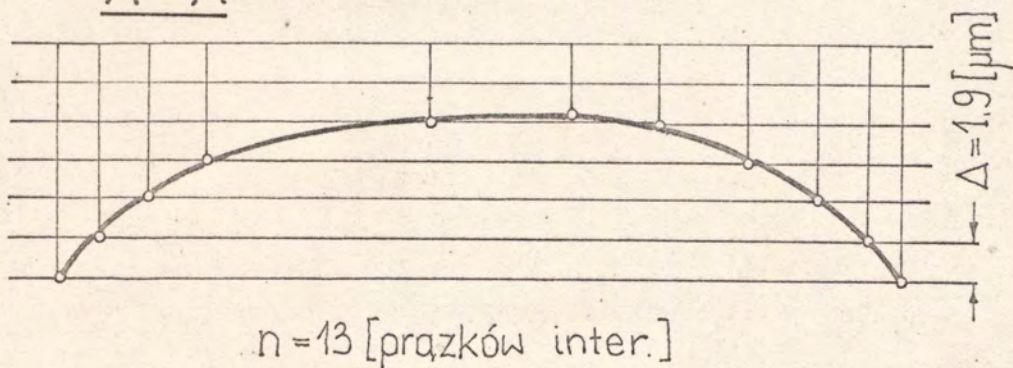
A. Powierzchnie płaskie
- jednorodne pole interferencyjne

a.)



$$Ra = 0,05 \text{ } [\mu\text{m}]; \quad \beta = 60^\circ; \quad C = 0,64$$

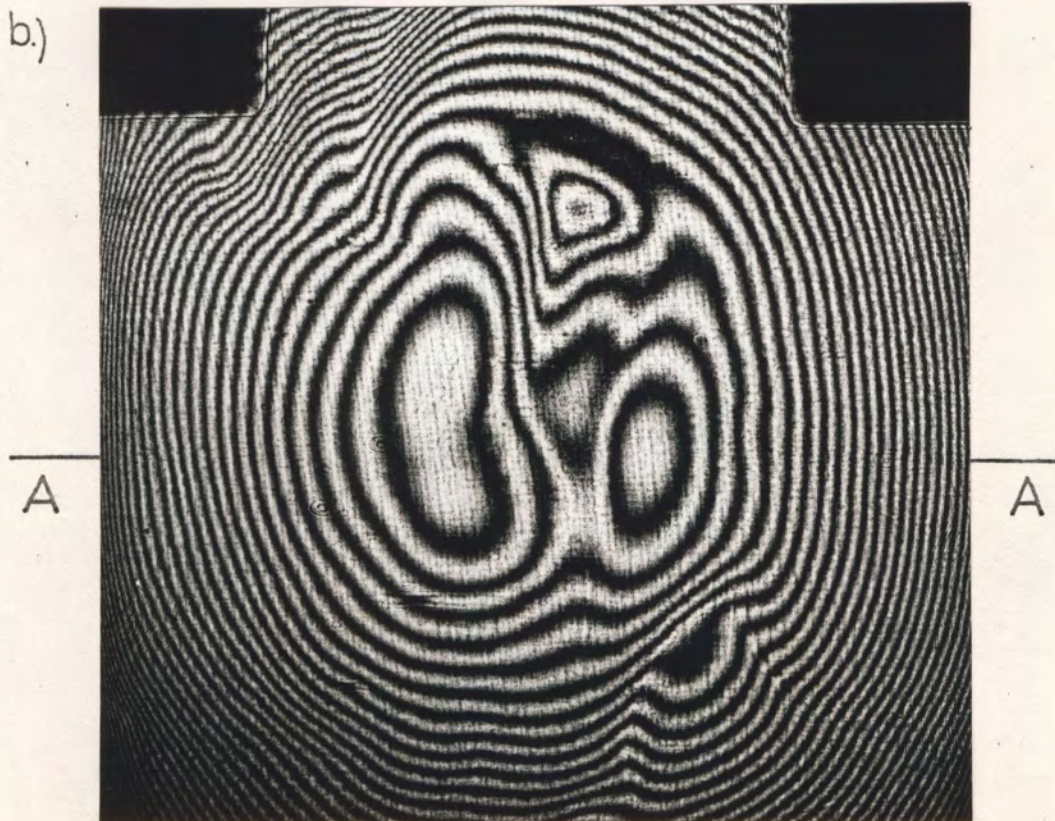
A - A



$$\Delta K = n \cdot \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = 13 \cdot 0,63 = 8,2 \text{ } [\mu\text{m}]$$

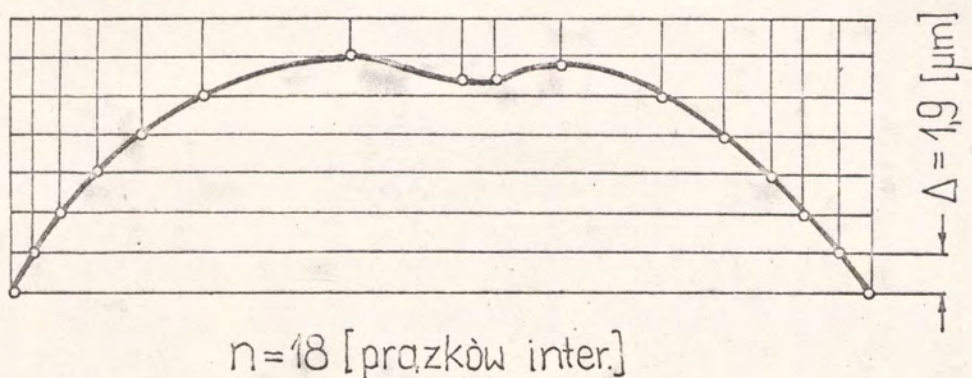
Ostatecznie poprawiony wynik pomiaru błędów kształtu po uwzględnieniu niepewności pomiaru na poziomie istotności 0,02 wynosi:

$$\Delta K = 8,2 \pm 0,3 \text{ } [\mu\text{m}]$$



$R_a = 0,05 \text{ } [\mu\text{m}]; \quad \beta = 60^\circ; \quad C = 0,64$

A-A



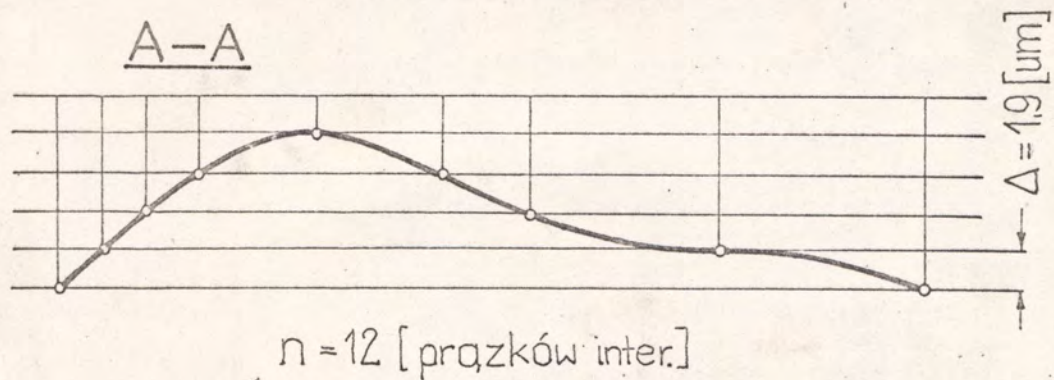
$$\Delta K = n \frac{\bar{\lambda}}{2 \cos \beta} = 18 \cdot 0,63 = 11,3 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Ostatecznie poprawiony wynik pomiaru błędów kształtu po uwzględnieniu niepewności pomiaru na poziomie istotności 0,02 wynosi:

$$\Delta K = 11,3 \pm 0,3 \text{ } [\mu\text{m}]$$



$$R_a = 0,05 \text{ } [\mu\text{m}]; \quad \beta = 60^\circ; \quad C = 0,64$$



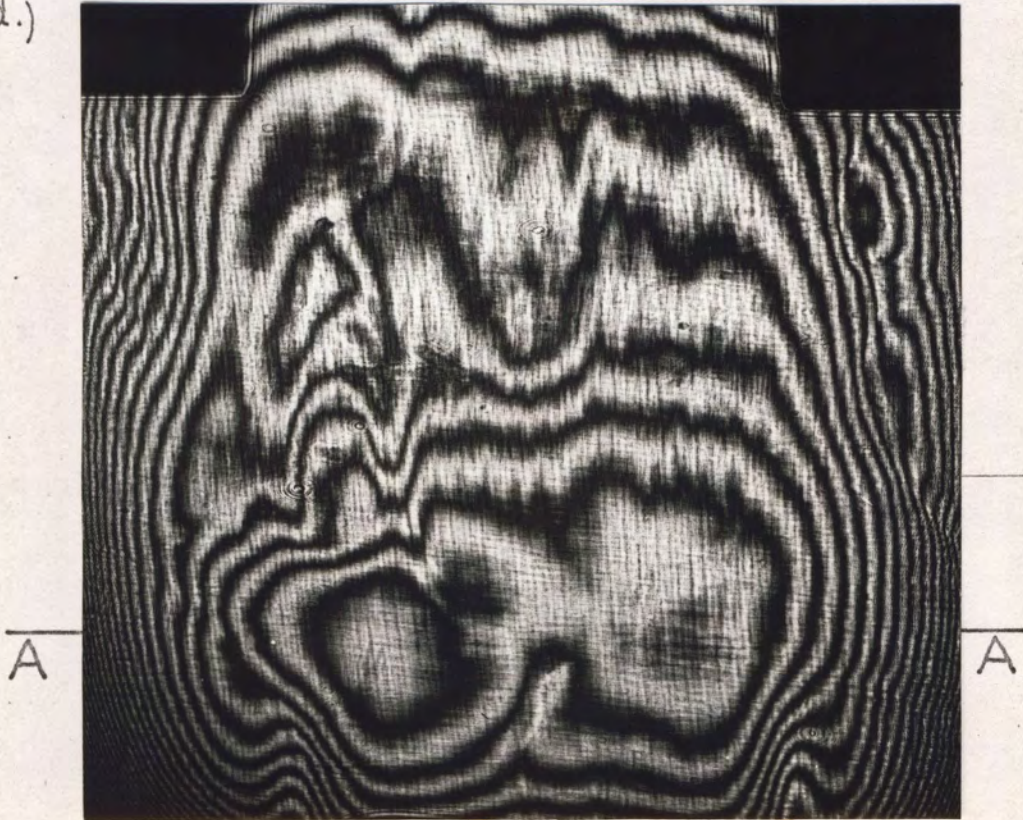
$$\Delta K = n \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = 12 \cdot 0,63 = 7,6 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Ostatecznie poprawiony wynik pomiaru błędów kształtu po uwzględnieniu niepewności pomiaru na poziomie istotności 0,02 wynosi:

$$\Delta K = 7,6 \pm 0,3 \text{ } [\mu\text{m}]$$

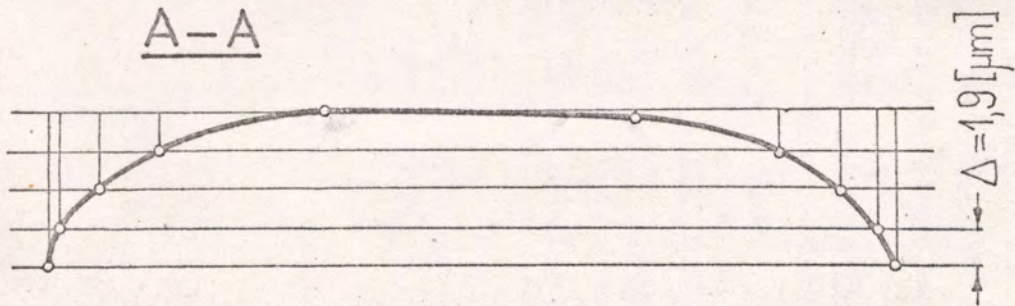
$$\Delta K =$$

d.)



$$R_a = 0,06 [\mu\text{m}] ; \beta = 60^\circ ; c = 0,62$$

A-A



$n = 13$ [przeków inter.]

$$\Delta K = n \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = 13 \cdot 0,63 = 8,2 [\mu\text{m}]$$

Ostatecznie poprawiony wynik pomiaru błędów kontaktu po uwzględnieniu niepewności pomiaru na poziomie istotności 0,02 wynosi:

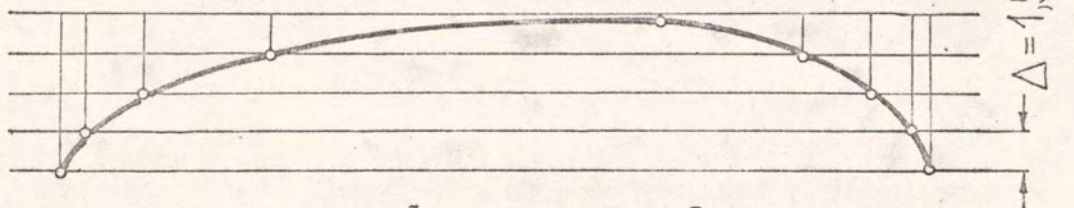
$$\Delta K = 8,2 \pm 0,3 [\mu\text{m}]$$

e.)



$R_a = 0,06 \text{ } [\mu\text{m}]; \quad \beta = 60^\circ; \quad C = 0,62$

A-A



$n = 11 \text{ [przeków inter]}$

$$\Delta K = n \cdot \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = 11 \cdot 0,63 = 6,9 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Ostatecznie poprawiony wynik pomiaru błędów kształtu po uwzględnieniu niepewności pomiaru na poziomie istotności 0,02 wynosi:

$$\Delta K = 6,9 \pm 0,3 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Rys. 49. Przykłady ukształtowania błędów kształtu różnych powierzchni płaskich oraz ich pomiar w polu jednorodnym.

- prążkowe pole interferencyjne

a/

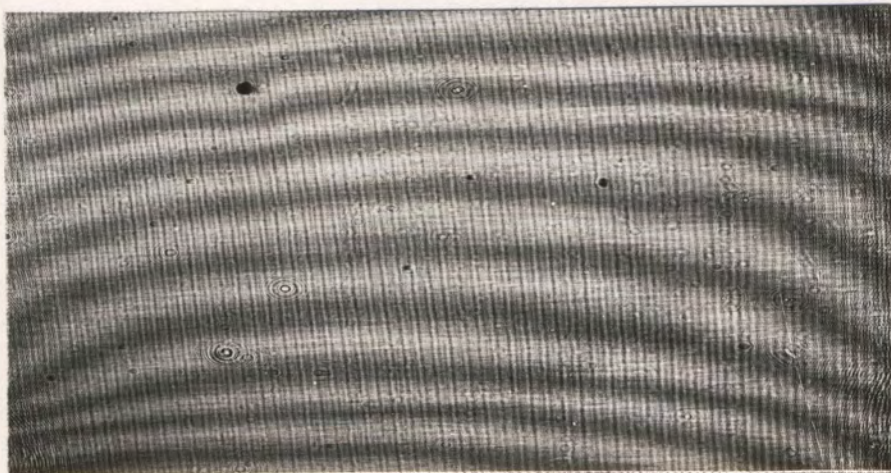


$$R_a = 0,04 \text{ } [\mu\text{m}], \quad \beta = 60^\circ, \quad c = 0,67$$
$$A = 7 \quad S_{p-(p-1)} = 8$$

$$\Delta K = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = \frac{7}{8} \cdot 0,63 = 0,55 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Powierzchnia wypukła

b/



$$R_a = 0,15 \text{ } [\mu\text{m}], \quad \beta = 60^\circ, \quad c = 0,42$$
$$A = 11 \quad S_{p-(p-1)} = 7$$

$$\Delta K = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = \frac{11}{7} \cdot 0,63 = 1 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Powierzchnia wypukła

c/



$$R_a = 0,16 \text{ } [\mu\text{m}], \quad \beta = 60^\circ \quad c = 0,4$$

$$A = 3, \quad S_{p-(p-1)} = 8$$

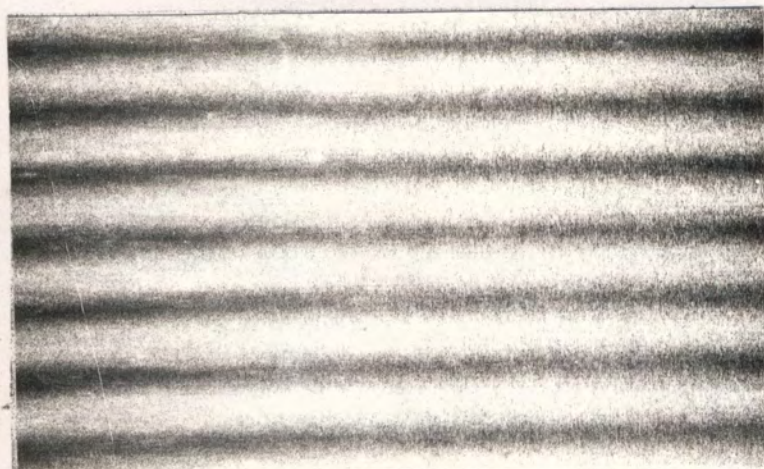
$$\Delta K = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = \frac{3}{8} \cdot 0,63 = 0,24 \text{ } [\mu\text{m}]$$

P o w i e r z c h n i a w y p u k ł a

Rys. 50. Przykłady pomiaru błędów kształtu
powierzchni płaskich w polu prążkowym

B. Wycinki zewnętrznych
powierzchni walcowych
- prążkowe pole interferencyjne

Hologram wykonano dla wybranej powierzchni, którą dalej przyjęto jako wzorcową. Interferogram powierzchni wzorcowej pokazano na rys. 51. Z rys. 51 widać, że prążki są proste, wynika z tego, że w tym miejscu błędy kształtu pomiędzy tymi powierzchniami są równe zeru.



Rys. 51. Prążkowe pole interferencyjne wycinków zewnętrznej powierzchni walcowej - wzorcowej

Przykłady pomiaru wycinków zewnętrznych powierzchni walcowych przedstawiono na rys. 52 a,b,c,d/. Na rys. 52 a,b,c/ w przebiegu prążków interferencyjnych widać, że powierzchnie są nieregularne - na przemian wklęsłe i wypukłe, natomiast na rys. 52 d/ widać, że kształt powierzchni badanej a niewielkimi odchyleniami w postaci rys itp. wstępnie jest regularny z wyraźnym uskokiem w środku próbki.

a/



$$A = 20, S_{p-(p-1)} = 7$$

$$\Delta K = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \cdot \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = \frac{20}{7} \cdot 0,63 = 1,8 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Powierzchnia nieregularna
wypukła -- wklęsła

b/



$$A = 10, S_{p-(p-1)} = 7$$

$$\Delta K = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \cdot \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = \frac{10}{7} \cdot 0,63 = 0,9 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Powierzchnia nieregularna
wypukła - wklęsła

wypukła - wklęsła

c/



$$A = 12, \quad S_{p-(p-1)} = 15$$

$$\Delta K = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = \frac{12}{15} \cdot 0,63 = 0,5 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Powierzchnia nieregularna
wypukła - wklęsła

d/



$$A = 24, \quad S_{p-(p-1)} = 12$$

$$\Delta K = \frac{A}{S_{p-(p-1)}} \frac{\lambda}{2 \cos \beta} = 2 \cdot 0,63 = 1,3 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Powierzchnia regularna
z uskokiem

Rys. 52. Przykłady pomiaru błędów kształtu wycinków zewnętrznych powierzchni cylindrycznych w polu prążkowym

3. WNIOSKI

Analiza teoretyczna zagadnienia oraz wyniki z badań doświadczalnych upoważniają do wyciągnięcia następujących wniosków:

3.1. Wnioski o charakterze poznawczym

Wysunięte na podstawie przeprowadzonej analizy teoretycznej hipotezy merytoryczne zostały w pełni potwierdzone:

- Skonstruowany przyrząd do ustalania próbek /badanych powierzchni/ na interferometrze holograficznym umożliwił spełnienie warunku minimalnej odchyłki pomiędzy powierzchnią wzorcową a powierzchnią badaną. Oznacza to, że został spełniony warunek najlepszego dopasowania powierzchni badanej względem powierzchni wzorcowej odtworzonej z hologramu - wyznaczony przez minimalną ilość prążków interferencyjnych możliwych do uzyskania pomiędzy tymi powierzchniami;
- Skonstruowany przyrząd do ustalania hologramów po przeprowadzonej obróbce fotochemicznej płyty fotograficznej umożliwia ustalenie hologramu w miejscu, w którym znajdowała się płyta fotograficzna w czasie procesu rejestracji /na prążek zerowy/;
- Badania wykazały, że dokładność laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego zależy przede wszystkim od dokładności poszczególnych podzespoków, z których zbudowany jest interferometr oraz od innych trudno uchwytnych czynników, które zostały nazwane w p. 1.2. czynnikami zakłócającymi;

- Badania optymalizacyjne wykazały, że kontrast prążków interferencyjnych zależy od czynników, które można podzielić na dwie grupy:

1/ Czynniki związane z właściwościami badanej powierzchni.

Do tej grupy należy zaliczyć chropowatość badanych powierzchni oraz rodzaj materiału /współczynnik odbicia powierzchni/

2/ Czynniki związane ze stanowiskiem badawczym.
Czynniki te podzielono na:

a/ czynniki zmienne, które poddano szczegółowym badaniom; do czynników tych zaliczono kąt padania wiązki przedmiotowej

b/ czynniki stałe, które ustalono na określonym, znanym poziomie w czasie badań np. różnicę dróg optycznych interferujących wiązek skompensowana do zera, kierunku polaryzacji interferujących wiązek światła ustalono tak, aby był normalny do płaszczyzny wyznaczonej przez osie tych wiązek

c/ czynniki zakłócające, które zostały wymienione w p. 1.2. a na które nie mamy wpływu.

- Badania rozpoznawcze wykazały, że przy odpowiednio dobranym stosunku natężeń interferujących wiązek światła, rodzaj materiału nie ma istotnego wpływu na kontrast prążków interferencyjnych. Chropowatość natomiast oraz kąt padania mają istotny wpływ na kontrast prążków, dlatego czynniki te poddano dokładnym szczegółowym badaniom

- Badania właściwe pozwoliły na zoptymalizowanie warunków holograficznego określania topografii błędów kształtu powierzchni, w wyniku czego opracowano matematyczny model na kontrast prążków interferencyjnych w zależności od kąta padania i chropowatości badanych powierzchni.

- Wyniki badań właściwych wykazały, że metoda interferometrii holograficznej umożliwia pomiar błędów kształtu powierzchni o większej chropowatości oraz że metoda ta umożliwia rozszerzenie zakresu pomiarowego interferometru w porównaniu z metodą interferometrii klasycznej

- Metoda interferometrii holograficznej umożliwia pomiar błędów kształtu powierzchni o większych rozmiarach w porównaniu z metodą interferometrii klasycznej

- Wstępne próby zastosowania metody holograficznej do pomiaru błędów kształtu wycinków zewnętrznych oraz wewnętrznych powierzchni walcowych dały pozytywne wyniki, jednak problem ten wymaga dalszych szczegółowych analiz i badań, które nie były przedmiotem pracy. Metodę interferometrii holograficznej określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn można będzie stosować do bardziej ogólnego przypadku powierzchni trójwymiarowych - co powinno być przedmiotem dalszych badań.

3.2. Wnioski o charakterze użytkowym

- Badania wykazały, że w zależności od chropowatości badanej powierzchni można dobrać optymalne warunki realizacji procesu. W tym celu opracowano model matematyczny badanego obiektu w postaci użytkowych wzorów empirycznych na kontrast prążków interferencyjnych. Ponadto dla celów użytkowych sporządzono tablicę doboru wartości kontrastu prążków dla określonych wartości chropowatości oraz kąta padania wiązki przedmiotowej.

- Rodzaj materiału /współczynnik odbicia powierzchni/ przy odpowiednio dobranym stosunku natężeń interferujących wiązek nie ma istotnego wpływu na kontrast prążków interferencyjnych - zatem wyniki badań właściwych przeprowadzonych na próbkach stalowych można uogólnić na wszystkie materiały objęte badaniami rozpoznawczymi

- Laboratoryjny model interferometru holograficznego zbudowany na bazie produkowanych w PZO zestawów holograficznych ZHL i ZHB oraz dodatkowego niezbędnego oprzyrządowania można wykorzystać bezpośrednio do określania topografii błędów kształtu płaszczyzn, przy czym pomiary można prowadzić zarówno w jednorodnym jak również prążkowym polu interferencyjnym

3.3. Wnioski dotyczące proponowanych kierunków dalszych prac

- Proponuje się, aby na podstawie otrzymanych wyników badań doświadczalnych opracować dokumentację prototypu rodziny interferometrów holograficznych do określania niepłaskości powierzchni, np. stożów przyrządów pomiarowych, płyt kontrolnych itd.

- W celu łatwego wyrównywania drogi optycznej interferujących wiązek dla dowolnych kątów padania w wybranym przedziale należałoby opracować kompensator drogi optycznej, nie naruszając podstawowej idei interferometru

- Przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni niepłaskich należałoby zastosować specjalne układy formujące wiązkę przedmiotową /być może można je będzie wykonać również metodami holograficznymi/, które umożliwiłyby stosowanie płyt fotograficznych mniejszych rozmiarów

- W celu rozszerzenia zakresu pomiarowego w górę proponuje się stosowanie innych metod pomiarów, np. metodę mularowych prążków, ewentualnie jeżeli ze względów technicznych będzie to możliwe zastosowanie laserów o większej długości emitowanej fali, np. lasera molekularnego na CO_2 $\lambda = 10,6$ [μm]

- Ze względu na trudności w wykonaniu powierzchni wzorcowych należy przeanalizować możliwość opracowania metod, które umożliwiłyby zastąpienie hologramów zarejestrowaną falą wzorcową uformowaną na wzorcu materialnym, hologramami syntetycznymi, na których zarejestrowane byłyby obrazy powierzchni wzorcowych przy użyciu komputerów, tzn. przejście na holografie komputerową.

B i b l i o g r a f i a

- [1] Archbald E., Burch J.M., Ennos A.E.: Application of holography to the comparison of cylinder bores. J.Sci. Instrum, 1967, vol. 44, no 8, s.489-494
- [2] Archbald E., Ennos A.E.: Techniques of hologram interferometry for engineering inspection and vibration analysis, Symposium of the engineering uses of holography, Glasgow, 1968, /Cambridge University Press, London, 1970, s.381-396/
- [3] Bałaziński B.: Metrologia warsztatowa, Wrocław. 1973
- [4] Bednarz B. Bilski Cz.: Kierunki rozwojowe holografii w technice pomiarowej, Czasopismo techniczne z.8-M /179/, 1974, s.15-20. PWN - Warszawa - Kraków
- [5] Born M., Wolf E.: Principles of optics, Oxford, Pergaman Press, 1964
- [6] Bronsztejn I., Siemiendiajew K.: Poradnik encyklopedyczny matematyka, PWN - W-wa, 1959
- [7] Bujnor G.N., Larionov N.P., Lukin A.V., Mustafin K.S., Rafikov R.A., Golograficzeskij interfierencionnyj kontrol asfieričeskich povierchnostiej, Optiko-mechan. prom., 1971, 38, no 4, s. 6-10
- [8] Chabros W., Butowtt J., Dubik A., Kaczyński R.: Podstawowe wiadomości o holografii, Przegląd Geodezyjny, 1972, no 10, s. 443-448
- [9] Collier K.J., Burckhardt C.B., Lin L.H.: Optical holography, New York, London, Academic Press, 1971
- [10] Czechowski T., Fisz M. Iwiński T., Lange O., Sadowski W., Zasepa R.: Tablica statystyczne, PWN - Warszawa 1957
- [11] Draper N.R., Smith H.: Analiza regresji stosowana, PWN - Warszawa, 1973

- [12] Feuer T., Kopica M., Matczak M.J.: Holograficzna topografia obiektów przy użyciu metody imersyjnej, Biuletyn WAT, 1976, r. XXV, no 3 /283/, s.69-75
- [13] Francon M.: Holographie, Masson et Gie, Paryż 1969
- [14] Frank S., Crawford Jr.: Fale, PWN - Warszawa 1972
- [15] Galas J.: Porównanie metody holograficznej i metody projekcji siatek periodycznych w zastosowaniu do badania deformacji oraz konturowania powierzchni, Praca dyplomowa, Uniwersytet Warszawski, 1976
- [16] Ginzburg V.M., Stepanova B.M.: Golografija metody i apparatura, Moskwa, Sovetskoe radio, 1974
- [17] Haines K.A., Hildebrand B.P.: Surface - deformation measurement using the wavefront reconstruction technique, Applied Optics, 1966, vol. 5., no 4, s.595-602
- [18] Hansler R.L., Application of holographic interferometry to the comparison of highly polished reflecting surfaces, Appl. Optics, 1968, vol. 7., no 4, s. 711-712
- [19] Helbig E.: Podstawy fotometrii, WNT - Warszawa, 1975
- [20] Hildebrand B.P., Haines K.A.: Interferometric measurements using the wave-front reconstruction techniques, Applied Optics, 1966, vol. 5, no1, s. 172 - 173
- [21] Hildebrand B.P., Haines K.A.: Multiple - wavelength and multiple-source holography applied to contour generation, Journ. Opt. Soc. Amer., 1967, vol. 57, no 2, s. 155-162
- [22] Horman M.H.: An application of waverfront reconstruction to interferometry, Appl. Optics, 1965, vol. 4, no 3, s. 333-336

- [23] Iaerisch W., Makosch G.: Optical contour mapping of surfaces, Applied Optics, 1973, vol. 12, no 7, s.1552-1557
- [24] Jerry S., Varner J.R.: Multiple-index holographic contouring, Applied Optics, 1969, vol. 8, no 7, s.1431-1434
- [25] Józwicki R.: Optyka instrumentalna, WNT -- Warszawa 1970
- [26] Kacprzyński B.: Planowanie eksperymentów podstawy matematyczne, WNT - Warszawa 1974
- [27] Kolman R.: Miernictwo warsztatowe, WPW - Warszawa 1971
- [28] Kolman R.: Ilościowe określenie jakości, PWE - Warszawa 1973
- [29] Kolman R., Meller E., Meller A.: Dokładność kształtu i położenia w procesach technologicznych, WNT - Warszawa 1969
- [30] Laboratorium pomiarów wielkości geometrycznych, praca zbiorowa pod redakcją E. Ratajczaka, WPW - Warszawa 1976
- [31] Larionov M.P., Lukin A.V., Mustafin K.S.: Golograficzny kontrol formy nepolirovannykh poverchnostiej Optiko-mech.prom. 1972, vol. 39, no 3, s.35-37
- [32] Larionov N.P., Lukin A.V., Mustafin K.S.: Golograficzny kontrol šlifovannykh poverchnostiej v otryzennom svete, Optiko-mechprom., 1973, vol. 40, no 1, s.66-67
- [33] Lovental S., Bel'vo I.: Prostanctvennaja fil'tracija i golografia - novoe v kogerentnoj optike, Moskva 1970
- [34] Łapiński M., Włodarski W.: Miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych, WNT - Warszawa, 1962

- [35] Mac-Govern A.J., Wyant J.C.: Computer generated holograms for testing optical elements. Appl. Optics. 1971, vol. 10, no 3, s. 619-624
- [36] Malinowski J.: Pomiary długości i kąta, WNT - Warszawa 1974
- [37] Meller E., Meller A.: Laboratorium metrologii warsztatowej, PWN - Warszawa - Poznań, 1973
- [38] Meller E., Meller A.: Nowy przyrząd do sprawdzania prostoliniowości, Mechanik 2/1965
- [39] Meller E., Meller A.: Sprawdzanie profilów żopatek turbinowych, Przegląd mechaniczny 3/1966
- [40] Meller E., Meller A.: Interferometr do pomiaru prostoliniowości długich płaszczyzn, Mechanik 2/1967
- [41] Nalimow W.W., Czernowa N.A.: Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych, WNT - Warszawa 1967
- [42] Oktaba W.: Metody statystyki matematycznej w doświadczalnictwie, PWN - Warszawa 1972
- [43] Ostrovskij Ju.I.: Golografija, Nauka, Leningrad 1970
- [44] Ostrovskij Ju.I.: Golografija i ee primenenie, Izdatelstvo "Nauka" Leningrad 1973
- [45] Palej M.A.: Otklonenija formy i raspolożenija poverchnostej, Standartgiz, Moskva 1965
- [46] Patent, Polska, nr 86837, Sposób pomiaru błędów kształtu, Politechnika Krakowska, Polska, Opubl. 19.06.1976 r.
- [47] Patent, Polska, nr 86868, Sposób pomiaru błędów kształtu, Politechnika Krakowska, Polska, Opubl. 19.06.1976 r.
- [48] Pawluczyk R.: Zasady holografii, Kinotechnik 1970, 23, no 258/1, s. 10-12

- [49] Pawluczyk R.: Niektóre możliwości zastosowań holografii w przemyśle, Problemy postępu technicznego, 1971, no 4, s. 14-16, oraz 1971, no 5, s.14-19
- [50] Pawluczyk R.: Nieniszczące badania materiałów i elementów maszyn metodami holograficznymi. Holografia, jej zastosowanie w nauce i technice - referat no 6 Warszawa - PKIN 27-28.XI.1973
- [51] Pawłowski Z.: Wstęp do statystyki matematycznej, PWN - Warszawa 1966
- [52] Piekara A.H.: Nowe oblicze optyki, PWN - Warszawa 1976
- [53] Pluta M.: Mikroskopia fazowo-kontrastowa i interferencyjna, PWN - Warszawa 1965
- [54] Polański Z.: Podstawy metodyki badań doświadczalnych. Materiały instruktażowe - IOS, 1975, no 112/1 oraz no 112/2
- [55] Poradnik metrologa warsztatowego, Praca zbiorowa, WNT - Warszawa 1973
- [56] Powell R.L., Stetson K.A.: Interferometric vibration analysis by wavefront rekonstruktion, Journal of the Optical society of America, 1965, vol. 55, no 12, s. 1593 - 1598
- [57] Rumszyski L.Z.: Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu, WNT - Warszawa 1973
- [58] Ruzinov L.Z.: Statisticheskiye metody optimalizacji chemiczeskich procesov, Moskva 1972
- [59] Rybińska-Górecka R.: Badania niedokładności metody tuszowania przy sprawdzaniu stożków, Praca doktorska, IOS - Kraków 1975
- [60] Sadowski A.: Pomiar warsztatowe i ćwiczenia, PWN - Warszawa, Kraków, 1973
- [61] Sadowski A.: Narzędzia pomiarowe do kontroli wymiarów - racjonalne podstawy doboru, WNT - Warszawa 1965

- [62] Sadowski A., Krehlik R.: Laser w obróbce materiałów i metrologii, WNT - Warszawa 1973
- [63] Siuta J.: Zastosowanie metod mrurowego efektu do pomiarów odkształceń, Praca dyplomowa, Politechnika Krakowska - Wydział Mechaniczny
- [64] Sharpe R.S.: Research techniques in nondestructive testing, London, New York 1970
- [65] Shiotake N., Tsuruta T., Hoh Y., Tsujiuchi J., Takeya N., Matsuda K.: Holographic generation of contour map of diffusely reflecting surface by using immersion method, Japanese Journal of Applied Physics 1968, vol. 7, no 8, s. 904-909
- [66] Smith H.M.: Principles of holography, Wiley - Interscience, New York 1969
- [67] Soroko L.M.: Osnovy golografii i kogerentnoj optiki izdatelstvo "Nauka", Moskva 1971
- [68] Stetson K.A., Powell R.L.: Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis, Journal of the Optical Society of America, 1965, vol. 55, no 12, s. 1694-1695
- [69] Stroke G.W.: An introduction to coherent optics and holography, New York. London: Academic Press 1966
- [70] Strzałkowski A., Śliżyński A.: Matematyczne metody opracowania wyników pomiarów, PWN - Warszawa 1973
- [71] Szczeniowski S.: Fizyka doświadczalna, cz.IV - Optyka, wyd. IV PWN - Warszawa 1971
- [72] Teokaris P.: Mrurowye polosy pri isslegovanii geformacij, izdatelstvo "Mir", Moskva 1972
- [73] Tomaszewski A.: Podstawy nowoczesnej metrologii, WNT - Warszawa 1975
- [74] Tomaszewski A.: Zarys metrologii warsztatowej, Warszawa 1955

- [75] Tomaszewski A.: Pomiar warsztatowe - ćwiczenia, Warszawa 1955
- [76] Tomaszewski A.: Geometria powierzchni części maszynowych, Warszawa 1955
- [77] Tomaszewski A.: Analiza harmoniczných błędów kształtu i chropowatości zarysów kołowych, Mechanik 9/1966
- [78] Tsuruta T., Itoh A.: Interferometric generation of counter lines on opaque objects, Optics Communications, 1969, vol. 1, no 1, s. 34-36
- [79] Tsuruta T., Shiotake N., Tsujiuchi J., Matsuda K.: Holographic generation of contour map of diffusely reflecting surface by using immersion method, Japan. J. Appl. Phys. 1967 /6/, s. 661-662
- [80] Vienot J.Ch., Śmigielski P., Royer H.: Holografia optyczna, WNT - Warszawa 1975
- [81] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów, WNT - Warszawa 1973
- [82] Warmus M.: Tablice funkcji elementarnych
- [83] Wilson E.B.: Wstęp do badań naukowych, PWN - Warszawa 1968
- [84] Wyant J.C., Bennett V.P.: Using komputer generated holograms to test aspheric wavefronts, Applied Optics, 1972, vol. 11, no 12, s. 2833-2839
- [85] Wyont J.C., Mac Govern A.J.: Computer generated holograms for testing aspheric optical elements, Comptes Rendus du Symposium International "Applications de l'holographie", Besancon 1970
- [86] Wybrane zagadnienia elektroniki kwantowej, praca zbiorowa pod redakcją Stankowskiego J., WKiŁ - Warszawa 1966
- [87] Zarubieżnaja radioelektronika, lazernaja golografija - osnovnye principy i primenenija 1966, no 2, s. 3-28

- [88] Zastępa R.: Badania statystyczne metodą reprezentacyjną, PWN - Warszawa 1962
- [89] Zieliński R.: Tablice statystyczne, Warszawa 1972
- [90] Zimny J.: Wpływ parametrów wiązki promieniowania laserowego na technologiczne wskaźniki obróbki fotonowej otworów w wybranych materiałach, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn, Kraków 1974

S t r e s z c z e n i e

Podjęto próbę zastosowania interferometrii holograficznej dla określania topografii błędów kształtu wybranych powierzchni części maszyn.

Badania zostały poprzedzone szczegółową analizą teoretyczną zagadnienia, w ramach której przeprowadzono analizę metod interferometrii klasycznej w aspekcie metrologicznym, jak również przeprowadzono analizę holograficznych metod interferometrycznych. Podano podstawowe zasady holografii oraz określono warunki holograficznego porównywania powierzchni części maszyn. Oprócz tego ze względu na małą ilość prac naukowych z tego zakresu przeanalizowano zagadnienie stosowania interferometrii holograficznej w innych dziedzinach. Dało to podstawy do podjęcia prób, rozwiązania postawionego celu pracy, tzn. do opracowania laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego i jego zastosowania do określania topografii błędów kształtu wybranych powierzchni części maszyn. Problem ten został wszechstronnie przeanalizowany i przebadany, w wyniku czego uzyskano minimalny błąd dokładności użytego interferometru holograficznego. W ramach analizy teoretycznej przeprowadzono też szczegółową analizę czynnikową. Określono zespół czynników charakteryzujących metodę określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn. Wyniki powyższej analizy zostały poddane szczegółowej weryfikacji doświadczalnej z zastosowaniem metod współczesnej teorii eksperymentu. Otrzymane wyniki badań doświadczalnych poddano analizie statystycznej oraz merytorycznej w celu określenia związków przyczynowych pomiędzy czynnikami charakteryzu-

jącymi badany proces a czynnikami wynikowymi.

Analiza statystyczna wyników badań objęła:

- analizę regresji stanowiącą podstawę do wyznaczenia matematycznego modelu obiektu badań.
- ocenę istotności współczynników regresji oraz
- ocenę adekwatności równań regresji.

Poza tym w ramach badań własnych przeprowadzono optymalizację czynników charakteryzujących metodę. Przeprowadzono też interpretację pola interferencyjnego, omówiono wpływ chropowatości i kąta padania na kontrast prążków interferencyjnych oraz przeprowadzono pomiary błędów kształtu wybranych powierzchni.

Spis tablic

- Tablica 1 - Zmiana czułości metody interferometrycznej w zależności od kąta padania dla światła lasera He-Ne
- Tablica 2 - Wyniki badań wierności wskazań zestawionego stanowiska badawczego
- Tablica 3 - Wykaz podzespołów laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego
- Tablica 4 - Wykaz dodatkowego wyposażenia laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego
- Tablica 5 - Wartości badanego czynnika β
- Tablica 6 - Wartości funkcji dla kąta padania
- Tablica 7 - Wartości funkcji dla kąta klina [82]
- Tablica 8 - Wyniki doświadczeń: $\beta = 0^\circ$
 $\varphi = 0^\circ 0' 30''$, $n_{1T} = 46$ [prążków inter.]
- Tablica 9 - Wyniki doświadczeń: $\beta = 20^\circ$,
 $\varphi = 0^\circ 0' 32''$, $n_{2T} = 46$ [prążków inter.]
- Tablica 10 - Wyniki doświadczeń: $\beta = 40^\circ$,
 $\varphi = 0^\circ 0' 39''$, $n_{3T} = 46$ [prążków inter.]
- Tablica 11 - Wyniki doświadczeń: $\beta = 60^\circ$
 $\varphi = 0^\circ 1' 0''$, $n_{4T} = 46$ [prążków inter.]
- Tablica 12 - Wyniki doświadczeń: $\beta = 80^\circ$
 $\varphi = 0^\circ 1' 0''$, $n_{5T} = 16$ [prążków inter.]
- Tablica 13 - Zestawienie wyników badań poprawności interferometru holograficznego
- Tablica 14 - Zestawienie wyników badań wierności interferometru holograficznego /średni błąd kwadratowy wierności wskazań, błędy graniczne wierności, zakres rozrzutu wskazań/

- Tablica 15 - Statystyczna analiza istotności wpływu kąta padania na błąd poprawności interferometru
- Tablica 16 - Zestawienie zbiorcze wyników badań wierności interferometru holograficznego /średni błąd kwadratowy wierności wskazań, błędy graniczne wierności oraz zakres rozrzutu wskazań interferometru/
- Tablica 17 - Wyniki badań liniowości wskazań czujnika używanego do pomiaru kontrastu
- Tablica 18 - Wyniki badań rozpoznawczych
- Tablica 19 - Statystyczna analiza istotności wpływu chropowatości R_a [μm] na kontrast prążków interferencyjnych
- Tablica 20 - Statystyczna analiza istotności wpływu kąta padania β [$^\circ$] [rd] na kontrast prążków interferencyjnych
- Tablica 21 - Statystyczna analiza istotności wpływu rodzaju materiału M na kontrast prążków interferencyjnych
- Tablica 22 - Charakterystyczne wartości programu PS/DS-P: λ_m [54]
- Tablica 23 - Schemat realizacji programu PS/DS-P λ_m przy $i = 2$, $n_0 = 5$, $\lambda_m = 1,414$
- Tablica 24 - Wyniki badań właściwych
- Tablica 25 - Wartości mnożników stosowanych do obliczania funkcji regresji wg programu PS/DS-P: λ_m
- Tablica 26 - Wartości pomocnicze do obliczania współczynników funkcji regresji wg programu PS/DS-P: λ_m bez stosowania filtracji
- Tablica 27 - Wartości pomocnicze do obliczania współczynników funkcji regresji wg programu PS/DS-P: λ_m z zastosowaniem filtracji

- Tablica 28 - Maksymalne wartości kontrastu prążków interferencyjnych przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn dla określonych wartości chropowatości R_a oraz kąta padania β bez stosowania filtracji częstości przestrzennych
- Tablica 29 - Maksymalne wartości kontrastu prążków interferencyjnych przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn dla określonych wartości chropowatości R_z oraz kąta padania β bez stosowania filtracji częstości przestrzennych
- Tablica 30 - Maksymalne wartości kontrastu prążków interferencyjnych przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn dla określonych wartości chropowatości R_a oraz kąta padania β z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych
- Tablica 31 - Maksymalne wartości kontrastu prążków interferencyjnych przy określaniu topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn dla określonych wartości chropowatości R_z oraz kąta padania β z zastosowaniem filtracji częstości przestrzennych
- Tablica 32 - Wartości średniego zakresu pomiarowego interferometru holograficznego : $\bar{S}_{p-p-1} = 2$ [mm],
 $\lambda = 0,6328$ [μm]

Spis rysunków

- Rys. 1. Próbki do badań
- Rys. 2. Schemat układu do analizy interferencji światła
- Rys. 3. Powstawanie prążków interferencyjnych jednakowej grubości
- Rys. 4. Schemat do analizy zmiany odchyłki kształtu pomiędzy powierzchniami A i B /przedstawiono tylko część powierzchni A i B/; a/ rozpatrywane powierzchnie A i B, b/ obraz prążków interferencyjnych
- Rys. 5. Schemat do wyznaczania odległości pomiędzy
a/ prążkiem jasnym i jasnym
b/ prążkiem jasnym i ciemnym
- Rys. 6. Pomiar równoległości wzniesiona śruby mikrometrycznej przy użyciu płytki interferencyjnej
- Rys. 7. Schemat zapisu hologramu
- Rys. 8. Schemat odtwarzania hologramu
- Rys. 9. Zasada tworzenia interferogramu na skutek porównania przedmiotu z obrazem holograficznym wzorca
- Rys. 10. Topografia
a/ wzorcowej powierzchni stożkowej
b/ badanej powierzchni stożkowej
- Rys. 11. Wpływ kąta padania wiązki światła na skrócenie obrazu powierzchni
a/ $\beta = 0^\circ$ - nie następuje skrócenia $a'' = a$
b/ $\beta \neq 0^\circ$ - następuje skrócenie $a'' < a$
- Rys. 12. Zmiana czułości w zależności od kąta padania dla światła lasera He-Ne — $\lambda = 0,6328 [\mu\text{m}]$
- Rys. 13. Ogólny schemat strukturalny obiektu badań

- Rys. 14. Analiza czynnikowa dokładności interferometru holograficznego
- Rys. 15. Analiza czynnikowa optymalizacji i zakresu pomiarowego interferometru holograficznego
- Rys. 16. Sposób pomiaru błędów kształtu I
- Rys. 17. Sposób pomiaru błędów kształtu II "
- a/ wykonanie ekspozycji dla powierzchni wzorcowej /hologramu/
 - b/ wykonanie ekspozycji dla powierzchni badanej /obserwacja w czasie rzeczywistym/
- Rys. 18. Przyrząd do ustalania próbek na interferometrze holograficznym
- a/ widok z przodu
 - b/ widok z tyłu
- Rys. 19. Schemat przyrządu do ustalania hologramów
- Rys. 20. Widok przyrządu do ustalania hologramu
- Rys. 21. Schemat układu optycznego interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn
- a/ wariant I
 - b/ wariant II
- Rys. 22. Schemat ideowy montażu
- a/ zespołów
 - b/ podzespołów
- laboratoryjnego modelu interferometru holograficznego do określania topografii błędów kształtu powierzchni części maszyn
- Rys. 23. Zasada justowania zespołu obiektyw-pinhole
- Rys. 24. Schemat realizacji zmodyfikowanego programu PS/DS-Up w badaniach wpływu kąta padania na błąd poprawności interferometru

- Rys. 25. Wzornik /maska/ do wyznaczania nominalnej wartości ramienia klina interferencyjnego
- Rys. 26. Schemat realizacji programu PS/DS-Up w badaniach rozpoznawczych wpływu chropowatości R_a , kąta padania β oraz rodzaju materiału M na kontrast prążków interferencyjnych C
- Rys. 27. Zależność wskazań czujnika od zmiany natężenia wiązki światła lasera He-Ne, $\lambda = 0,6328$ [μm]
- Rys. 28. Schemat kompozycji kodowych wartości badanych czynników w programie PS/DS-P: λ_m dla dwóch czynników badanych /i = 2/
- Rys. 29. Układy interferometru holograficznego dla poszczególnych kątów padania wiązki przedmiotowej
- Rys. 30. Nierównomierna zmiana odległości pomiędzy prążkami w polu jednorodnym
a/ rozpatrywana powierzchnia
b/ obraz prążków interferencyjnych
- Rys. 31. Zmiana kontrastu prążków interferencyjnych
a/ $R_a = 0,003$ [μm] , $\beta = 0^\circ$
b/ $R_a = 0,126$ [μm] , $\beta = 0^\circ$
c/ $R_a = 0,003$ [μm] , $\beta = 60^\circ$
d/ $R_a = 0,126$ [μm] , $\beta = 60^\circ$
- Rys. 32. Wpływ chropowatości badanych powierzchni na kontrast prążków interferencyjnych
- Rys. 33. Wpływ kąta padania wiązki przedmiotowej na kontrast prążków interferencyjnych
- Rys. 34. Jednorodne pole interferencyjne
- Rys. 35. Prążkowe pole interferencyjne
- Rys. 36. Schemat wyznaczania błędu kształtu w polu prążkowym
- Rys. 37. Pomiar błędów kształtu w jednorodnym polu interferencyjnym

- Rys. 38. Pomiar błędów kształtu w prążkowym polu interferencyjnym
- Rys. 39. Topografia błędów kształtu badanej powierzchni płaskiej
- Rys. 40. Różne ukształtowania prążków interferencyjnych ze wzrostem docisku
- Rys. 41. Ukształtowanie prążków interferencyjnych w przypadku powierzchni
a/ wypukłej
b/ wklęsłej
- Rys. 42. Ukształtowanie błędów kształtu powierzchni dla różnych przekrojów topograficznej mapy błędów z rys. 39
- Rys. 43. Model mikronierówności badanej powierzchni
- Rys. 44. Ugięcie światła na badanej powierzchni
- Rys. 45. Schemat realizacji optycznej filtracji częstości przestrzennych
- Rys. 46. Widma częstości przestrzennych wiązki przedmiotowej badanych powierzchni
a/ $R_a = 0,003$ [μm], b/ $R_a = 0,024$ [μm]
c/ $R_a = 0,075$ [μm], d/ $R_a = 0,126$ [μm]
e/ $R_a = 0,147$ [μm].
- Rys. 47. Filtracja częstości przestrzennych wiązki przedmiotowej
- Rys. 48. Widok układu do filtracji częstości przestrzennych
- Rys. 49. Przykłady ukształtowania błędów kształtu różnych powierzchni płaskich oraz ich pomiar w polu jednorodnym
- Rys. 50. Przykłady pomiaru błędów kształtu powierzchni płaskich w polu prążkowym

Rys. 51. Prążkowe pole interferencyjne wycinka zewnętrznej powierzchni walcowej - wzorcowej

Rys. 52. Przykłady pomiaru błędów kształtu wycinków zewnętrznych powierzchni cylindrycznych w polu prążkowym