

## WYZNACZANIE PRZEMIESZCZEŃ I ODKSZTAŁCEŃ NA PODSTAWIE KONTRASTU PRAŻKÓW NA OBRAZACH INTERFEROMETRII HOLOGRAFICZNEJ\*

MAREK J. MATCZAK

*Uniwersytet Szczeciński*

### 1. Wstęp

Interferometria holograficzna [1] jest dziedziną stosunkowo młodą, powstałą w latach sześćdziesiątych prawie równocześnie z uruchomieniem pierwszych laserów, które są niezbędnymi dla tej techniki pomiarowej źródłami światła stanowiącego tu mechanicznie bezkontaktowy nośnik informacji. Podstawową własnością światła laserowego, wykorzystywaną w interferometrii holograficznej, jest spójność promieniowania umożliwiająca realizację zjawisk interferencyjnych, na których oparty jest zapis informacji i formowanie obrazów interferencyjnych. Obecnie znanych jest wiele technik uzyskiwania interferogramów holograficznych. Wybór odpowiedniej techniki w konkretnym przypadku podyktowany jest własnościami badanego obiektu i warunkami pomiaru. Technika uzyskiwania hologramów z zapisanym obrazem interferencyjnym jest jednak tylko pierwszym etapem na drodze prowadzącej do wyznaczenia poszukiwanych wielkości pomiarowych. Drugi etap polega na uformowaniu obrazu interferencyjnego za pomocą układu optycznego (oko ludzkie, kamera fotograficzna lub telewizyjna, inny wyspecjalizowany układ optyczny) odwzorowującego rozkład pola świetlnego odtwarzanego z hologramu. Ogólny opis powstałego obrazu interferencyjnego zależy w znacznym stopniu od parametrów tego układu. Trzecim i ostatnim etapem jest tu, na ogół numeryczne, przetwarzanie rozkładu natężenia światła w obrazie interferencyjnym na poszukiwane wielkości pomiarowe.

Realizację dwu ostatnich etapów można przeprowadzić na wiele różnych sposobów, które nazwiemy tu metodami pomiarowo-interpretacyjnymi. Z punktu widzenia aktualnej wiedzy można wyróżnić trzy grupy takich metod.

Historycznie pierwsza grupa metod oparta jest na pomiarze przestrzennej lokalizacji prążków interferencyjnych [2-5]; jej syntetyczne omówienie zawarte jest w monografii [6]. Są to niestety metody wyłącznie punktowe i nie poddają się automatyzacji procesu pomiarowego. Jak dotąd, nie znalazły one praktycznego zastosowania w pomiarach ilościowych.

Druga grupa metod pomiarowo-interpretacyjnych bazuje na rozkładzie prążków interferencyjnych na powierzchni badanego obiektu. W grupie tej należy wyróżnić trzy

\* Praca wygłoszona na XII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa - Jadwisin 1986.

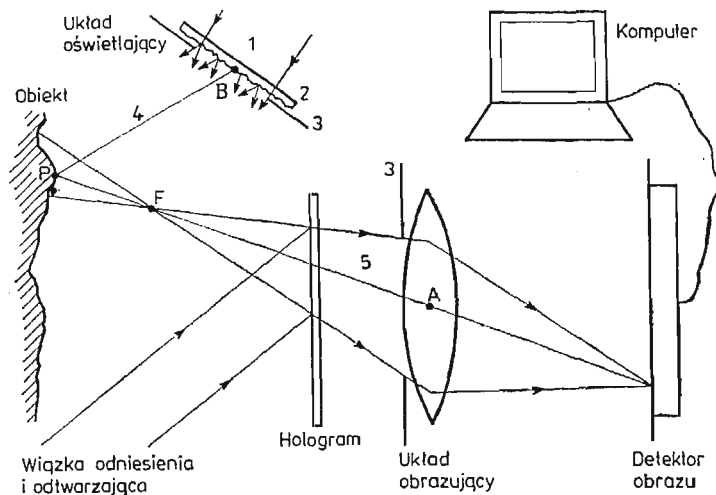
metody, które zdały już egzamin praktyczny: kinetyczna metoda zliczania prążków [7] — wyłącznie punktowa; metoda absolutnego rzędu prążka, zwana również metodą prążka zerowego rzędu [8] — dominująca obecnie w praktycznych zastosowaniach interferometrii holograficznej jako poddająca się automatyzacji metoda połowa; oraz statyczna metoda różnicowa [9] — wymagająca minimum aż czterech różnych hologramów, lecz umożliwiającą ilościową interpretację w przypadkach, w których wyznaczenie absolutnej wartości rzędu prążków interferencyjnych jest niemożliwe. Metody należące do tej grupy pozwalają na bezpośrednie wyznaczenie co najwyżej pola przemieszczeń, z którego następnie można uzyskać pole odkształceń za pomocą różniczkowania numerycznego, prowadzącego jednak zazwyczaj do bardzo niskiej dokładności wyników obliczeń przez znaczne spotęgowanie bezpośrednich błędów pomiarowych.

Trzecia grupa metod oparta jest na pomiarze kontrastu prążków interferencyjnych. W pierwszym etapie tworzenia tej grupy metod ograniczono się do analizy przypadku, w którym optyczny układ obrazujący jest ściśle zogniskowany na badanym punkcie powierzchni obiektu, a apertury zarówno w układzie dyfuzyjnie oświetlającym obiekt jak i obrazującym są kołowe [10]. Teoretyczna analiza tego przypadku umożliwiła ściśle wyjaśnienie oraz doświadczalną weryfikację wpływu dyfuzyjnego oświetlenia obiektu na rozkład natężenia światła w obrazie interferencyjnym [11] oraz pierwsze zastosowania występujących tu efektów fizycznych [12, 13]. Następnie uogólniono analizę problemu na przypadek dowolnych apertur [14] oraz doświadczalnie zweryfikowano pewne szczególne przypadki [15]. Obraz interferencyjny, utworzony przez układ optyczny ściśle zogniskowany na powierzchni obiektu, charakteryzuje się rozkładem kontrastu prążków jednoznacznie zdeterminowanym przez rozkład określonych składowych wektora przemieszczenia. Analiza obrazów interferencyjnych uzyskanych za pomocą rozogniskowanego układu optycznego była następnym etapem rozwoju metod kontrastu prążków [16]. W tym przypadku rozkład kontrastu prążków w obrazie interferencyjnym zależy również od rozkładu elementów tensora odkształcenia i tensora obrotu, opisujących deformację badanego obiektu. Ta informacja zawarta w obrazie interferencyjnym pozwoliła na opracowanie połowych metod wyznaczania przemieszczeń [17] i odkształceń [18] na podstawie kontrastu prążków. Analiza zagadnienia modyfikacji oświetlenia obiektu między dwiema ekspozycjami holograficznymi ujawniła również możliwość zastosowania metod kontrastu prążków do wyznaczania kształtu powierzchni badanego obiektu [19], co ze względu na techniczną prostotę realizacji pomiaru wydaje się być konkurencyjne w stosunku do skomplikowanych technicznie immersyjnych i bichromatycznych holograficznych metod warstwiczowania obiektów.

## 2. Układ pomiarowy

Schemat układu pomiarowego do holograficznego wyznaczenia przemieszczeń i odkształceń metodą kontrastu prążków interferencyjnych przedstawiony jest na rys. 1. Badany obiekt oświetlony jest w ogólności rozproszonym światłem spójnym za pomocą układu oświetlającego, którego podstawowym elementem jest dyfuzor 2, składający się z jednej lub kilku matówek. Wiązka światła laserowego 1 rozprasza się na dyfuzorze,

a diafragma 3 organiczną czynną powierzchnię układu oświetlającego. W szczególnych przypadkach, o których jest mowa dalej, można zastosować układ oświetlający, który formuje falę sferyczną lub płaską. Rozproszone od obiektu światło pada na płytę holo-



Rys. 1. Schemat holograficzno-optycznego układu pomiarowego (objaśnienia w tekście)

graficzną, gdzie interferuje ze spójną wiązką odniesienia tworząc holograficzny zapis fali propagującej się od obiektu (tzw. wiązki przedmiotowej). W przypadku badania dynamicznych obciążeń obiektu (w tym także i drgań) należy zastosować dwuimpulsową metodę rejestracji holograficznej z ustaloną wcześniej odległością czasową między impulsami laserowymi. Wówczas na hologramie zostaną oddzielnie zarejestrowane dwie wiązki przedmiotowe, niosące informację odpowiednio o dwu różnych stanach badanego obiektu. Gdy badania dotyczą obciążeń statycznych, to można również zastosować metodę czasu rzeczywistego, wymagającą jedynie pojedynczej ekspozycji holograficznej dla wybranego stanu obciążenia obiektu.

Po wywołaniu i utrwaleniu hologramu należy go oświetlić wiązką odtwarzającą o geometrii identycznej z wiązką odniesienia użytą w procesie zapisu. W przypadku hologramu dwuekspozycyjnego zrekonstruowane wówczas zostaną jednocześnie dwie wiązki przedmiotowe, zapisane uprzednio w różnych chwilach czasu, i po przejściu przez obrazujący układ optyczny utworzą w jego płaszczyźnie obrazowej interferencyjny obraz badanego obiektu. Metoda czasu rzeczywistego wymaga umieszczenia wykonanego hologramu jednoekspozycyjnego dokładnie w miejsce, w którym się znajdował w procesie zapisu. Wtedy zrekonstruowana wiązka przedmiotowa interferuje w płaszczyźnie obrazowej z wiązką propagującą się aktualnie od obiektu, a zmiana jego stanu obciążenia w stosunku do obciążenia występującego podczas rejestracji holograficznej spowoduje powstanie obrazu interferencyjnego.

W ogólności obrazujący układ optyczny nie musi być zogniskowany na powierzchni badanego obiektu lub miejsca lokalizacji jej obrazu pozornego, widzianego przez hologram. Warunek dokładnego zogniskowania jest konieczny tylko dla niektórych, omówionych dalej, metod pomiarowych. Istotnym elementem układu obrazującego jest diafragma

3, której kształt i rozmiary mają zasadnicze znaczenie dla ilościowej interpretacji obrazów interferencyjnych oraz określają czułość metody.

W płaszczyźnie obrazowej optycznego układu obrazującego umieszczony jest detektor obrazu, którym może być zarówno siatkówka oka ludzkiego, emulsja fotograficzna, lampa analizująca kamery telewizyjnej jak i macierz detektorów optoelektronicznych. Dla automatycznej interpretacji ilościowej najbardziej odpowiednia jest jedna z dwu ostatnich możliwości, gdyż zastosowanie kliszy fotograficznej jako pośredniego medium rejestracji obrazu interferencyjnego może prowadzić do znacznych błędów rozkładu kontrastu wczytywanego do komputera w procesie densytometrycznym ze względu na niekontrolowaną na ogół nieliniowość charakterystyki fotograficznego materiału światłoczułego.

Ostatnim elementem układu pomiarowo-interpretacyjnego jest komputer, w którym dokonywana jest obróbka obrazu interferencyjnego oraz jego interpretacja ilościowa na bazie algorytmów numerycznych opracowanych na podstawie równań interferometrii holograficznej. Wybór odpowiedniego komputera powinien wynikać z analizy potrzeb użytkownika w zakresie wielkości powierzchni badanego obiektu, pożądanej zdolności rozdzielczej obrazów interferencyjnych, rodzaju poszukiwanych wielkości oraz wymaganej szybkości obliczeń. Minimalną dla tych potrzeb konfigurację hardware'ową stanowi mikrokomputer klasy IBM PC.

### 3. Ogólne równania interferometrii holograficznej

Rozkład natężenia światła w obrazie interferencyjnym, powstającym w płaszczyźnie obrazowej optycznego układu obrazującego (rys. 1 — płaszczyzna detektora obrazu), ma następującą ogólną postać [14]:

$$I = I_0 [1 + P_V(x)P_I(y) \cos D(f)], \quad (1)$$

gdzie  $I_0$  jest rozkładem natężenia światła w nieinterferencyjnym obrazie obiektu;  $P_V$  i  $P_I$  są funkcjami aperturowymi będącymi transformacjami fourierowskimi funkcji źrenic  $p_V$  i  $p_I$  opisujących kształt diafragm odpowiednio w obrazującym układzie optycznym i w układzie oświetlającym:

$$P(z) = \int_{-\infty}^{\infty} p(r) \exp(-ikz \cdot r) dr, \quad (2)$$

gdzie  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  jest długością fali użytego światła laserowego, a  $r$  — wektorem wodzącym w płaszczyźnie diafragmy.  $D = 2\pi f$  jest funkcją różnicy fazowej interferujących wiązek przedmiotowych, a  $f$  — rzędem prążka interferencyjnego.

Argumenty funkcji występujących w wyrażeniu (1) związane są z wielkościami opisującymi deformację obiektu w następujący sposób [16, 17]:

$$x = \frac{1}{L} N_A \left\{ N_V u + (L_V - L) S_V \left[ \frac{1}{L_I} N_I u + (\nabla \times u) g \right] \right\} \quad (3)$$

$$y = \frac{1}{L_I} N_B N_I u, \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{\lambda} \mathbf{g} \cdot \mathbf{u}, \quad (5)$$

gdzie  $\mathbf{u}$  jest wektorem przemieszczenia danego punktu powierzchni obiektu między dwoma porównywanymi interferencyjnie stanami obciążenia obiektu,  $\nabla \times \mathbf{u}$  — iloczynem tensorem wektorowego operatora różniczkowego „nabla” i wektora przemieszczenia, zwanym tensorem gradientu przemieszczenia,  $\mathbf{g}$  — wektorem czułości układu holograficznego, będącym sumą wektorów jednostkowych wyznaczających, odpowiednio, kierunki oświetlenia i obserwacji (4 i 5 na rys. 1),  $\mathbf{N}$  — operatorem projekcji normalnej: na płaszczyznę diafragmy w układzie obrazującym ( $\mathbf{N}_A$ ) i oświetlającym ( $\mathbf{N}_B$ ), oraz na płaszczyznę prostopadłą do kierunku obserwacji ( $\mathbf{N}_V$ ) i oświetlenia ( $\mathbf{N}_I$ ),  $S_V$  — operatorem projekcji skośnej wzdłuż normalnej do powierzchni obiektu na płaszczyznę prostopadłą do kierunku obserwacji.  $L$  ( $= \overline{AF}$  na rys. 1) oznacza odległość zogniskowania układu obrazującego,  $L_V$  ( $= \overline{AP}$ ) i  $L_I$  ( $= \overline{BP}$ ) — odległości danego punktu  $P$  na powierzchni obiektu, odpowiednio, od centrów  $A$  i  $B$  układu obrazującego i oświetlającego.

Wzory (3÷5) stanowią zbiór ogólnych równań interferometrii holograficznej. Zawierają one informację o trzech różnych składowych wektora przemieszczenia, przy czym pierwsze z tych równań opisuje ponadto sześć niezależnych składowych tensora gradientu przemieszczenia, z których można bezpośrednio zbudować dla małych deformacji tensory odkształceń  $E_S$  i obrotów  $R_S$  powierzchni badanego obiektu [18]:

$$E_S = \frac{1}{2} N_S [\nabla \times \mathbf{u} + (\nabla \times \mathbf{u})^T] N_S, \quad (6)$$

$$R_S = \frac{1}{2} N_S [\nabla \times \mathbf{u} - (\nabla \times \mathbf{u})^T] N_S + \hat{\varepsilon} \{ [N_S (\nabla \times \mathbf{u}) \mathbf{n}_S] \hat{\varepsilon} \mathbf{n}_S \}, \quad (7)$$

gdzie  $T$  oznacza transpozycję macierzy,  $N_S$  jest operatorem projekcji normalnej na płaszczyznę styczną do powierzchni obiektu,  $\mathbf{n}_S$  — wektorem jednostkowym normalnym do tej powierzchni, a  $\hat{\varepsilon}$  — trójwymiarowym operatorem permutacji. Pierwszy składnik we wzorze (7) opisuje obrót elementu objętościowego wokół normalnej do jego powierzchni, natomiast drugi — obrót powierzchni wywołany zarówno inklinacją elementu objętościowego jak i jego odkształceniem ścinającym.

Wielkości występujące po lewej stronie równań (3÷5) należy wyznaczyć na podstawie analizy obrazów interferencyjnych, opisanych ogólnie wzorem (1). Funkcja  $\cos D$  występująca w tym wzorze opisuje rozkład prążków interferencyjnych na powierzchni badanego obiektu, natomiast występujący przed nią czynnik  $P_V P_I$  związany jest z ich kontrastem  $V$  (inaczej: widzialnością), zdefiniowanym następująco:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (8)$$

gdzie  $I_{max}$  i  $I_{min}$  oznaczają maksymalną i minimalną wartość natężenia światła w sąsiedztwie danego punktu powierzchni obiektu na obrazie interferencyjnym, co odpowiada sąsiadującym ze sobą prążkom: jasnemu i ciemnemu. Z definicji (8) zastosowanej do wzoru (1) wynika, że:

$$V = |P_V P_I|. \quad (9)$$

Uwzględniając fakt, że funkcje  $P_V$  i  $P_I$  mogą przyjmować zarówno dodatnie jak i ujemne wartości, można zatem przekształcić wzór (1) do następującej postaci:

$$I = I_0 \left\{ 1 + V \cos \left[ D + \frac{\pi}{2} (1 - \operatorname{sgn} P_V P_I) \right] \right\}. \quad (10)$$

Jak wynika z powyższej analizy, wektorowe argumenty  $x$  i  $y$  funkcji aperturowych można wyznaczyć na podstawie pomiaru kontrastu prążków w obrazach interferencyjnych utworzonych przy zastosowaniu diafragm o odpowiednim kształcie i orientacji. Na przykład, gdy diaphragma ma kształt kołowy, to:

$$P(z) = 2 \frac{J_1(kR|z|)}{kR|z|}, \quad (11)$$

gdzie  $J_1$  oznacza funkcję Bessela pierwszego rodzaju i pierwszego rzędu, a  $R$  jest promieniem diaphragmy. W przypadku diaphragmy szczelinowej:

$$P(z) = \frac{\sin \left( kl \cdot \frac{z}{2} \right)}{kl \cdot \frac{z}{2}}, \quad (12)$$

gdzie wektor  $l$  określa długość i orientację szczeliny.

#### 4. Wyznaczanie pola przemieszczeń

Jedną z grup metod wyznaczania pola przemieszczeń na podstawie pomiaru kontrastu prążków w obrazie interferencyjnym bazuje na następującej tożsamości algebraicznej [17]:

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{g} \cdot \mathbf{u}}{\mathbf{g} \cdot \mathbf{n}_V} \mathbf{n}_V + V_G N_V \mathbf{u}, \quad (13)$$

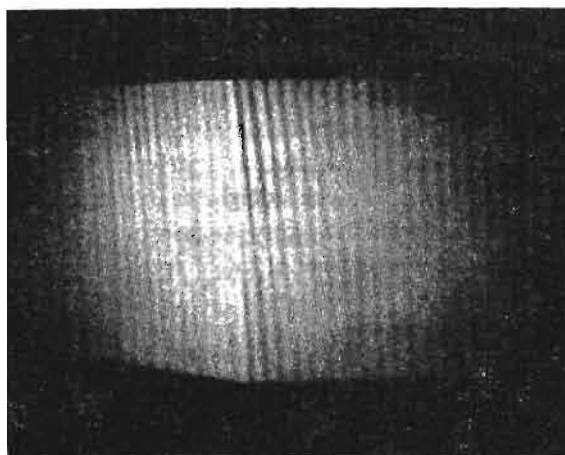
gdzie  $\mathbf{n}_V$  jest wektorem jednostkowym wyznaczającym kierunek obserwacji obiektu, a  $V_G$  — operatorem projekcji skośnej wzdłuż kierunku obserwacji na płaszczyznę prostopadłą do wektora czułości  $\mathbf{g}$ .

Wartość pierwszego składnika we wzorze (13) można wyznaczyć znając rozkład wartości rzędu prążka  $f$  na powierzchni badanego obiektu (patrz wzór (5)). Pomocnicza metoda doświadczalna wyznaczania tego rozkładu polega na identyfikacji prążka zerowego rzędu, który zlokalizowany jest na ogół w miejscach zerowego przemieszczenia. Gdy zarówno układ oświetlający jak i obrazujący wyposażony jest w diaphragmę kołową, przy czym ten ostatni zogniskowany jest na powierzchni obiektu ( $L = L_V$ ), to w miejscach tych kontrast przyjmuje wartość maksymalną  $V = 1$ . Rząd następných prążków ma wartość bezwzględną kolejno rosnącą o 1 (patrz rys. 2).

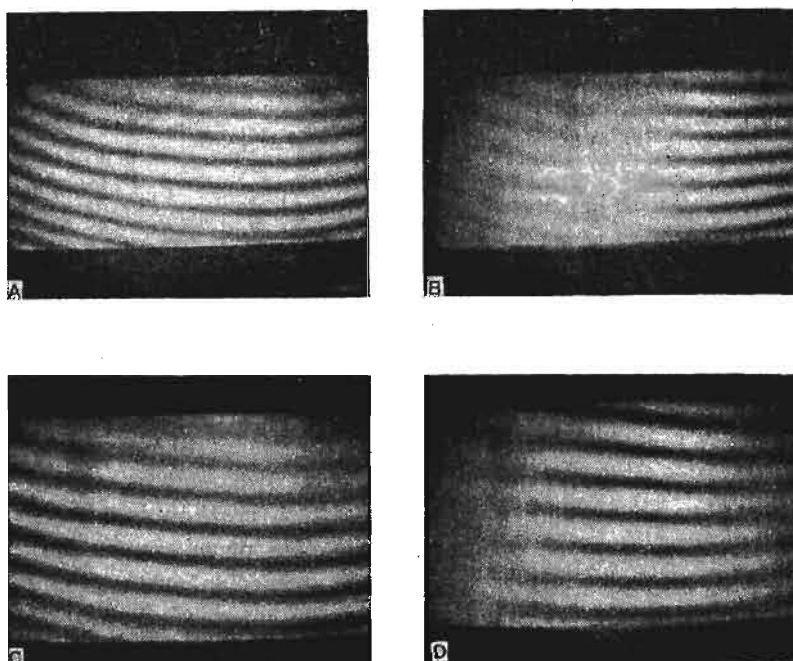
Wyznaczenie wartości drugiego składnika we wzorze (13) sprowadza się do wyznaczenia wektora  $N_V \mathbf{u}$ , będącego rzutem wektora przemieszczenia na płaszczyznę prostopadłą do kierunku obserwacji. Istnieje kilka technik doświadczalnego wyznaczania tej wielkości. W przypadku, gdy powierzchnia obiektu jest płaska lub gdy decydujemy się na dokony-

wanie pomiarów oddzielnie dla wybranych punktów powierzchni, można łatwo zrealizować warunek  $L = L_V$ , redukując równanie (3) do postaci:

$$x = \frac{1}{L_V} N_A N_V u \quad \text{lub} \quad N_V u = L_V A_V x, \quad (14)$$



Rys. 2. Obraz interferencyjny obiektu obróconego wokół osi przecinającej górną część jego powierzchni, uzyskany przy zastosowaniu diafragm kołowych



Rys. 3. Obrazy interferencyjne obiektu obróconego wokół normalnej do jego powierzchni, uzyskane dla odległości ogniskowania  $L_1$  (a, b) oraz  $L_2 < L_1$  (c, d) przy zastosowaniu diafragmy szczelinowej o orientacji poziomej (a, c) i pionowej (b, d)

gdzie  $A_V$  jest operatorem projekcji skośnej wzdłuż normalnej do płaszczyzny diafragmy na płaszczyznę prostopadłą do kierunku obserwacji. Wzajemnie prostopadłe składowe wektora  $x$  w płaszczyźnie diafragmy zawierającej ten wektor można wyznaczyć na podstawie pomiaru rozkładu kontrastu w dwu obrazach interferencyjnych otrzymanych z tego samego hologramu przy użyciu diafragmy szczelinowej w dwu wzajemnie prostopadłych jej orientacjach (patrz wzór (12)), gdy obiekt był oświetlony falą płaską lub sferyczną, tzn. gdy  $P_I \equiv 1$  i  $V = |P_V|$ . W przypadku, gdy powierzchnia nie jest płaska, a więc gdy nie można zogniskować układu obrazującego równocześnie na wszystkie jej punkty, to wektor  $N_V u$  można wyznaczyć na drodze automatycznej analizy połowej na podstawie pomiaru rozkładu kontrastu w czterech obrazach interferencyjnych (rys. 3) otrzymanych z tego samego hologramu dla dwu różnych odległości ogniskowania,  $L_1$  i  $L_2$ , i dla dwu wzajemnie prostopadłych orientacji diafragmy szczelinowej. Z każdej pary obrazów, oddzielnie dla  $L_1$  i  $L_2$ , wyznacza się wektory  $x_1$  i  $x_2$  w sposób omówiony dla poprzedniego przypadku. Wówczas [17]:

$$N_V u = \frac{1}{L_1 - L_2} A_V [(L_V - L_2)L_1 x_1 - (L_V - L_1)L_2 x_2]. \quad (15)$$

Wektorowe składniki we wzorze (13) mogą być wyznaczone jedynie z dokładnością do ich kierunku (lecz już nie zwrotu). Wyboru właściwej kombinacji znakowej można dokonać na podstawie pomiaru kontrastu w obrazie interferencyjnym, uzyskanym za pomocą układu obrazującego o bardzo małej kołowej aperturze kątowej ( $R/L \ll 1$ ) przy dyfuzyjnym oświetleniu obiektu, tzn. w warunkach, gdy  $P_V \equiv 1$  i  $V = |P_I|$ . Wówczas właściwy wektor  $u$ , obliczony na podstawie równania (13), musi spełniać następujące równanie (patrz wzory (11) i (4)):

$$\left| 2 \frac{J_1(kR |N_B N_I u|/L_I)}{kR |N_B N_I u|/L_I} \right| = V, \quad (16)$$

gdzie, w tym przypadku,  $R$  jest promieniem diafragmy kołowej w układzie oświetlającym, a  $V$  — wartością kontrastu w tak uzyskanym obrazie. Zwrot wektora  $u$  jest nadal nieokreślony, co generalnie wynika z faktu, że obraz interferencyjny „nie pamięta”, który z dwu porównywanych stanów obiektu był stanem początkowym.

W przypadku, gdy rozkład rzędu prążka nie może być z góry określony, nawet przy zastosowaniu metody identyfikacji prążka zerowego rzędu, wówczas można ten rozkład wyznaczyć rozwiązując równanie kwadratowe względem  $f$ , powstałe z podniesienia do kwadratu argumentu funkcji Bessela, obliczonego z równania (16), oraz przy zastosowaniu wzorów (13) i (5). Wybór właściwego pierwiastka tego równania wynika z analizy położenia badanego punktu powierzchni względem sąsiednich prążków interferencyjnych.

Omówiona powyżej grupa metod wyznaczania pola przemieszczeń bazuje tylko na jednym interferogramie holograficznym, co jest jej szczególną zaletą. Inne grupy metod oparte na pomiarze kontrastu wymagają większej liczby interferogramów holograficznych [14], co jednak pozwala całkowicie wyeliminować z analizy rozkład rzędu prążka interferencyjnego.



### 5. Wyznaczanie pola odkształceń

W myśl wzorów (6) i (7), wyznaczenie pola odkształceń powierzchni, jak i tensora obrotu jej elementów, sprowadza się do wyznaczenia tensora lewostronnej projekcji gradientu przemieszczenia,  $N_S(\nabla \times u)$ , który explicite występuje we wzorze (3) określającym argument funkcji aperturowej układu obrazującego, decydującej o rozkładzie kontrastu w obrazie interferencyjnym. W przypadku oświetlenia obiektu falą płaską ( $L_I \rightarrow \infty$ ) argument ten redukuje się do postaci, która po prostym przekształceniu prowadzi do następującego równania [18]:

$$N_S(\nabla \times u)g = \frac{1}{L_V - L} N_S(L A_V x - N_V u), \quad (17)$$

przy czym  $P_I \equiv 1$  i  $V = |P_V(x)|$ . Wyznaczenie poszukiwanej wielkości wymaga skonstruowania równania tensorowego z trzech równań typu (17). Rozwiązanie takiego równania przyjmuje wówczas postać:

$$N_S(\nabla \times u) = W G^{-1}, \quad (18)$$

gdzie:

$$W = [w_1, w_2, w_3], \quad G = [g_1, g_2, g_3], \quad (19)$$

przy czym  $g_i (i = 1, 2, 3)$  są różnymi wektorami czułości układu holograficznego, które nie powinny leżeć w jednej płaszczyźnie, aby móc zbudować  $G^{-1}$ , natomiast wektory  $w_i$  w najprostszym pomiarowo układzie są zdefiniowane następująco:

$$w_i = \frac{1}{L_V - L} N_S A_V \left\{ L x_i - \frac{1}{L - L'} [(L_V - L') L x_i - (L_V - L) L' x'_i] \right\} \quad (20)$$

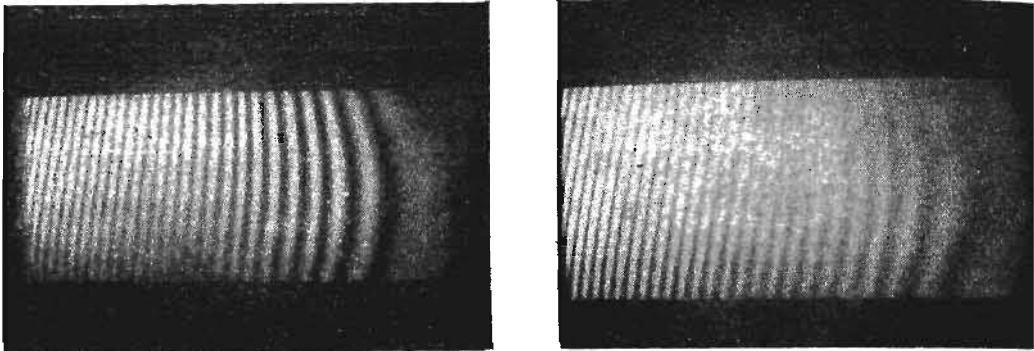
gdzie  $x_i$  wyznacza się w sposób analogiczny do opisanego w poprzednim paragrafie na podstawie obrazów interferencyjnych, uzyskanych dla różnych kierunków oświetlenia obiektu, determinujących różne wektory  $g_i$ , przy tym samym kierunku obserwacji i tej samej odległości ogniskowania  $L$ . Wektor  $x'_i$  wyznacza się z dwu obrazów dla  $g_1$  i dla odległości ogniskowania  $L' \neq L$ . Tak więc tensor odkształceń powierzchni określony jest ostatecznie następującym wzorem [18]:

$$E_S = \frac{1}{2} [W G^{-1} N_S + (W G^{-1} N_S)^T]. \quad (21)$$

Osiem obrazów interferencyjnych, niezbędnych do wyznaczenia tym sposobem pola odkształceń uzyskiwanych jest z trzech różnych interferogramów dla różnych wektorów czułości, przy czym interferogramy te powinny być równocześnie zarejestrowane na tym samym hologramie za pomocą trzech różnych par wiązek odniesienia i oświetlających obiekt, w taki sposób, że pary te są wzajemnie niespójne, a spójność występuje jedynie między wiązkami należącymi do tej samej pary, co można osiągnąć przez wytworzenie takiej różnicy dróg optycznych między tymi parami, która jest większa od drogi spójności lasera [20], lub przez zastosowanie lasera trójczęstotliwościowego [21].

Zależność kontrastu prążków od wartości odkształceń pozwala również na bezpośrednią, jakościową ocenę ich rozkładu na powierzchni badanego obiektu. W miejscach,

w których zmiana kontrastu jest największa podczas przeogniskowywania układu obrazującego występują największe odkształcenia, i odwrotnie. Prawidłowość tę ilustruje rys. 4.



Rys. 4. Obrazy interferencyjne ugięcia płyty sztywno zamocowanej wzdłuż jej prawej krawędzi; po lewej — dla układu obrazującego zogniskowanego na powierzchni płyty, po prawej — z przeogniskowaniem

## 6. Uwagi końcowe

Podstawowe równania interferometrii holograficznej zostały wyprowadzone przy założeniu, że obiekt rozprasza światło stochastycznie, oraz że proces zapisu holograficznego odbywa się w liniowej części charakterystyki materiału światłoczułego. Pominięto również szum optyczny, generowany przez rozproszenie światła na ziarnistej strukturze emulsji hologramu w procesie rekonstrukcji holograficznej obrazu. W praktyce założenia te w mniejszym lub większym stopniu nie są spełnione, co powoduje, że w obrazie interferencyjnym pojawia się tło świetlne obniżające kontrast tego obrazu. Uwzględnienie tego efektu w procesie interpretacyjnym nie jest jednak trudne, lecz wymaga zwiększenia liczby analizowanych obrazów.

Metody oparte na pomiarze kontrastu prążków umożliwiają wyznaczenie pól przemieszczeń i odkształceń bez znajomości rozkładu rzędu prążka interferencyjnego oraz bez konieczności różniczkowania pola przemieszczeń w celu wyznaczenia odkształceń.

Istotną zaletą tych metod jest możliwość sterowania w szerokim zakresie czułością pomiarów przez zmianę rozmiarów diafragm stosowanych w układzie holograficzno-pomiarowym.

Niniejsza praca została wykonana w ramach Centralnego Programu Badań Podstawowych Nr 02.20.

## Literatura

1. *Holografia optyczna*, pod red. M. PLUTY, PWN, Warszawa 1980.
2. K. A. HAINES, B. P. HILDEBRAND, *Surface-deformation measurement using the wavefront reconstruction technique*, *App. Opt.* 5, no. 4, 595 - 602, 1966.
3. W. T. WELFORD, *Fringe visibility and localization in hologram interferometry*, *Opt. Commun.* 1, 123 - 125, 1969.
4. S. WALLIS, *Visibility and localization of fringes in holographic interferometry of diffusely reflecting surfaces*, *Ark. Fys.* 40, 299 - 403, 1970.

5. K. A. STETSON, *Fringe interpretation for hologram interferometry of rigid-body motions and homogeneous deformations*, J. Opt. Soc. Am. 64, 1 - 10, 1974.
6. W. SCHUMANN, M. DUBAS, *Holographic Interferometry*, Springer Verlag, Berlin 1979.
7. E. B. ALEKSANDROV, A. M. BONCH-BRUEVICH, *Investigation of surface strains by the hologram technique*, Sov. Phys.-Tech. J. 12, 258 - 265, 1967.
8. A. E. ENNOS, *Measurement of in-plane surface strain by hologram interferometry*, J. Sci. Instrum. 1, no. 7, 731 - 734, 1968.
9. H. KREITLOW, Ph. D. THESIS, Techn. Univ. Hannover, 1976.
10. M. J. MATCZAK, *Fringe visibility method as a new method of holographic interferograms interpretation*, Proc. SPIE, Vol. 370, 163 - 167, 1982.
11. M. J. MATCZAK, R. PAWLUCZYK, Z. KRASKA, *Diffuse illumination in holographic interferometry*, Proc. SPIE, Vol. 370, 216 - 220, 1982.
12. Z. KRASKA, R. PAWLUCZYK, M. J. MATCZAK, *Identification of the local minima of fringes order in holographic interferometry*, Proc. SPIE, Vol. 370, 206 - 210, 1982.
13. R. PAWLUCZYK, Z. KRASKA, *Diffuse illumination in holographic double-aperture interferometry*, Appl. Opt. 24, no. 18, 3072 - 3078, 1985.
14. M. J. MATCZAK, *Diffractional description of interference image formation and its consequences in holographic interferometry*, Proc. EOC'83 (European Optical Conference on Optics in Science and Technology), Rydzyna (Poland) 1983, pp. 130 - 139.
15. M. YONEMURA, *Holographic measurement of in-plane deformation using fringe visibility*, Optik 63, no. 2, 167 - 177, 1983.
16. M. J. MATCZAK, *The fringe visibility method and different applications of it*, FMC-Series, no. 26, 109 - 120, 1987.
17. M. J. MATCZAK, *Single-hologram method for evaluating displacement field*, Proc. SPIE, Vol. 661, 280 - 285, 1986.
18. M. J. MATCZAK, *Direct holographic determination of the rotation and strain fields by means of the fringe visibility method*, Proc. SPIE, Vol. 661, 286 - 289, 1986.
19. M. J. MATCZAK, *Holographic determination of the surface shape by means of the fringe visibility method*, Proc. SPIE, Vol. 661, 328 - 331, 1986.
20. Z. FÜZESSY, *Methods of holographic interferometry for industrial measurements*, Period. Polytech. 21, 257, 1977.
21. Z. FÜZESSY, *Measurement of 3-D displacement by incoherent superposition of interferograms*, Israel J. Techn. 18, 251, 1980.

## Р е з ю м е

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ КОНТРАСТА ПОЛОС  
НА ОБРАЗАХ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

На фоне методов голографической интерферометрии представлено теоретические основы метода контраста интерференционных полос, который применяется для определения перемещений и деформации поверхности объектов. Представленный метод делает возможным определить перемещения и деформации без необходимости определения ряда полосы и затруднительного дифференцирования перемещений.

## S u m m a r y

DISPLACEMENT AND STRAIN EVALUATION ON THE BASIS OF FRINGE CONTRAST IN  
HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

On the background of different methods of holographic interferometry (Sec. 1), the theoretical idea of the fringe visibility method (Sec. 3) on the basis of the holographic measuring system (Sec. 2) has been

discussed. Application of this method to displacement (Sec. 4) and strain (Sec. 5) evaluation has been presented. Some practical remarks relating to the method (Sec. 6) have been also given.

The presented method enables to determine the displacement and strain fields without knowledge of the fringe order distribution and without necessity to differentiate the displacement field.

*Praca wpłynęła do Redakcji dnia 1 czerwca 1987 roku.*

---