

POMIARY PRZEMIESZCZEŃ NORMALNYCH DO POWIERZCHNI OBIEKTU
METODĄ FOTOGRAFII PŁAMKOWEJ W ŚWIETLE BIAŁYM

WALDEMAR BACHMACZ
JERZY PISAREK
Politechnika Częstochowska

Wstęp

Praca prezentuje metodę projekcyjną fotografii płamkowej, wykorzystującą niekoherentne źródła światła, pozwalającą wyznaczyć normalną do powierzchni obiektu składową wektora przemieszczenia.

Metoda w swej istocie zbliżona jest do metody rastrów, [8] [9] [14] [15] [18] [22], nie wymaga jednak stosowania precyzyjnych układów optycznych ani stosowania specjalnych siatek (rastrów), nie stwarza też trudności w interpretacji wyników i oszacowaniach błędów.

W metodzie proponowanej przez autorów na powierzchnię obiektu rzutowana jest stochastyczna struktura płamkowa, zbliżona do obrazu płamkowego obserwowanego na powierzchni przedmiotów oświetlonych światłem spójnym. Podobnie jak w klasycznej, koherentnej fotografii płamkowej struktura płamkowa jest fotografowana na tej samej klatce filmowej dwukrotnie, tzn. przed i po obciążeniu obiektu. Otrzymane w powyższy sposób przeźrocze, zwane dalej — zgodnie z przyjętym w literaturze przedmiotu, uporządkowanym przez V. J. PARKS'A [19] i K. A. Stetsona układem pojęć dotyczących fotografii i interferometrii płamkowej — specklogramem, może być analizowane podobnymi metodami jak specklogramy laserowe i pozwala na otrzymanie zarówno mapy warstwicznej przemieszczeń, jak i ich wartości w dowolnym punkcie (obszarze) powierzchni obiektu. Obszerny opis zasady działania używanych do tego celu procesów optycznych zawiera praca [5], a przykłady ich zastosowań praktycznych w koherentnej fotografii płamkowej prace [1], [3], [7], [10], [16], [17], [18], [19].

Rozwój fotografii płamkowej zapoczątkowany został przez TOKARSKIEGO i BURCHA [4]. W 1970 r. FERNELIUS i TOME [12] zastosowali ją w analizie drgań. Połowej analizy przemieszczeń liniowych dokonali w 1972 r. ARCHBOLD i ENNOS [1] i niezależnie od nich TIZIANI [21]. CHIANG i JUANG [7] przeprowadzili w 1976 r. pomiary ugięć płyt. W Polsce koherentną fotografią płamkową zajmują się m.in. Z. Orłoś i M. Matczak (WAT), J. Stupnicki (Pol. Warszawska), A. Bełzowski i H. Kasprzak (Pol. Wrocławska), E. Mróz (CLO).

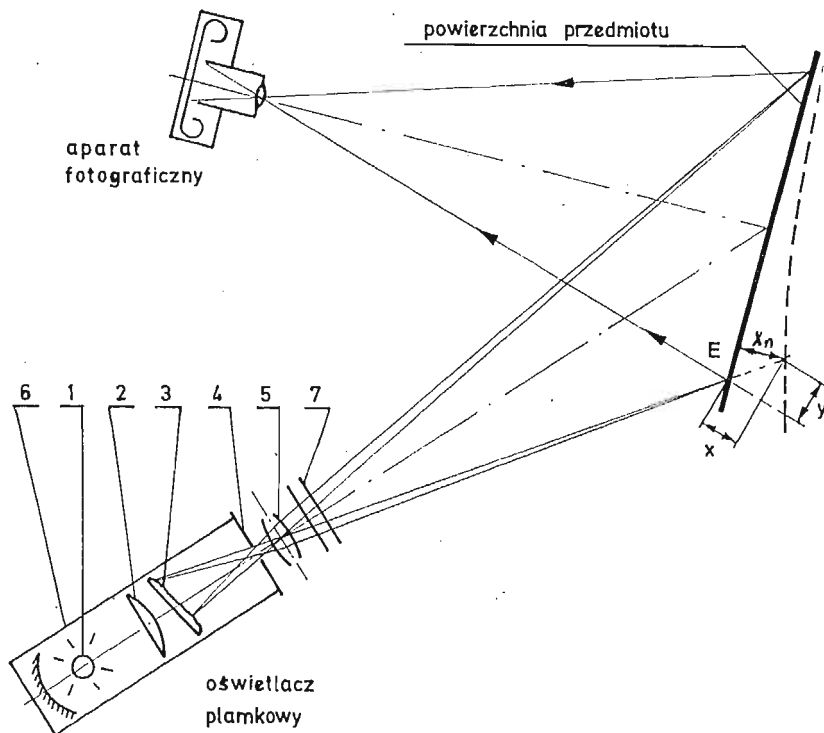
Metody fotografii płamkowej wymagają użycia jako źródła światła lasera, co ogranicza ich stosowalność do przedmiotów o małych wymiarach. Istnieją ponadto pewne trudności w pomiarach dużych przemieszczeń. Wad tych pozbawiona jest metoda nieko-

herentnej fotografii plamkowej. W 1975 r. C. FORNO [11] uzyskał obrazy plamkowe pokrywając badane obiekty specjalną farbą odbłaskową i oświetlając je zwykłym reflektorem. CHIANG i ASUNDI [6] otrzymali efekt „sztucznego plamkowania” wykonując swe modele z materiału w którym rozproszona była zawiesina drobnych ziarenek szkła.

Cechą wspólną wymienionych wyżej metod koherentnej i niekoherentnej fotografii plamkowej jest generacja struktur plamkowych przez powierzchnię obiektu. Umożliwiają one pomiar przemieszczeń kątowych lub prostopadłej do kierunku obserwacji składowej przemieszczenia liniowego. Składowa przemieszczenia liniowego równoległa do kierunku obserwacji nie jest natomiast przy ich pomocy wykrywalna. W metodzie proponowanej przez autorów powierzchnia obiektu stanowi jedynie ekran, na który rzutowana jest struktura plamkowa i którego przemieszczenia normalne powodują proporcjonalne przemieszczenia jej obrazu, rejestrowane na specklogramie. Pozwala ona na punktową i polową analizę prostopadłej do powierzchni przedmiotu składowej przemieszczenia i nie wymaga stosowania ani lasera, ani specjalnych odbłaskowych farb. Metoda białych plamek projekcyjnych jest więc uzupełnieniem metod opracowanych przez Forno, Asundi i Chiang'a.

1. Istota metody projekcyjnej

Stanowisko pomiarowe (rys. 1) składa się z projektora, zwanego dalej oświetlaczem plamkowym i małoobrazkowego aparatu fotograficznego. Jeśli przedmiot ma niewielkie wymiary liniowe (rzędu 1 m) można do generacji struktur plamkowych użyć typowego



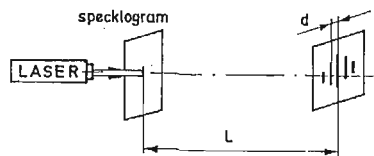
Rys. 1

rzutnika przezroczy wstawiając w miejsce przezrocza matówkę wykonaną metodą piaskowania. Obraz matówki rzucony na powierzchnię przedmiotu daje strukturę plamkową o wymaganych parametrach. Przemieszczenie normalne „ x_k ” i przedmiotu powoduje proporcjonalne przemieszczenie rzutowanych plamek. Ich obraz przesuwa się na błonie filmowej o wielkość $M \cdot y$, gdzie M — powiększenie układu optycznego aparatu fotograficznego. Wykonanie na tej samej klatce fotograficznej zdjęć dwu kolejnych położeń obiektu powoduje nałożenie się na siebie odpowiadających im struktur plamkowych podobnie jak dzieje się to w „klasycznej”, koherentnej fotografii plamkowej. Po fotochemicznej obróbce filmu przesunięte względem siebie plamki tworzą na nim rodzaj minisiatek dyfrakcyjnych. Taki film nazwano specklogramem. Jeśli zmiana wielkości przemieszczenia $M \cdot y$ (gradient) jest w rozpatrywanym obszarze specklogramu niewielka, to prześwietlając go wiązką lasera (rys. 2) uzyskamy szereg wiązek odchylonych w płaszczyźnie (y, z) o kąty

$$\vartheta_n = \arctg(n \cdot \lambda / M \cdot y) \dots \quad \text{gdzie } n = 0, 1, 2, 3 \quad (1)$$

λ — długość fali świetlnej

Umieszczając w odległości „ L ” za specklogramem ekran „ E ” otrzymamy na nim szereg równoległych prążków, tzw. prążków Young’a, prostopadłych do przemieszczenia „ y ”

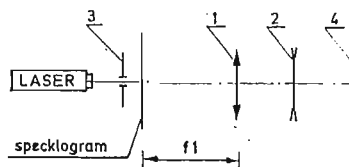


Rys. 2

tego obszaru obiektu, któremu odpowiada prześwietlany wiązką lasera fragment specklogramu. Przemieszczenie „ y ” wyznaczyć możemy ze wzoru

$$y = \frac{\lambda \cdot L}{d \cdot M} \quad \text{gdzie } d \text{ — odległość między prążkami.} \quad (2)$$

Prążki Young’a odznaczają się na ogół niskim kontrastem, zwłaszcza jeśli używamy materiałów fotograficznych gorszej jakości. Znacznie lepsze rezultaty uzyskać można stosując układ przedstawiony na rys. 3, gdzie 1,2 — soczewki $f+400$ i $f-1000$, 3—diagrama, 4 — ekran, matówka lub błona fotograficzna. Jako źródło światła zastosowano laser He-Ne typ LG-600 o długości fali $0,6328 \mu\text{m}$ i mocy ok. 3 mW w modzie podstawowym.



Rys. 3

Przemieszczenie „ y ” obliczymy wtedy ze wzoru

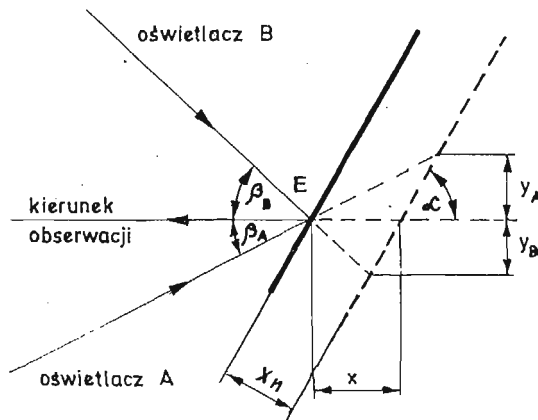
$$y = \frac{\lambda \cdot f'}{d \cdot M} \quad \text{gdzie } f' \text{ — zastępcza ogniskowa układu soczewek 1 i 2.} \quad (3)$$

Możliwe jest również wyznaczenie przemieszczenia „ y ” bez pomocy lasera, przy użyciu niekoherentnych procesów optycznych. Jedną ze stosowanych przez autorów konstrukcji takiego procesora omówiono w dalszej części pracy.

Jeśli zarejestrujemy niezależnie od siebie zdjęcia struktur plamkowych pochodzących od dwu różnych oświetlaczy A i B , to znając geometrię układu (rys. 4), w którym wykonano obie fotografie możemy wyznaczyć kąt „ α ” nachylenia rozpatrywanego fragmentu „ E ” badanej powierzchni do kierunku obserwacji oraz jej przemieszczenie normalne „ x_n ”

$$\alpha = \arccot \left(\frac{y_A}{y_B + y_A} \cot \beta_A - \frac{y_B}{y_B + y_A} \cot \beta_B \right), \quad (4)$$

$$x_n = y_A (\cot \beta_A - \cot \alpha) \cos \alpha. \quad (5)$$

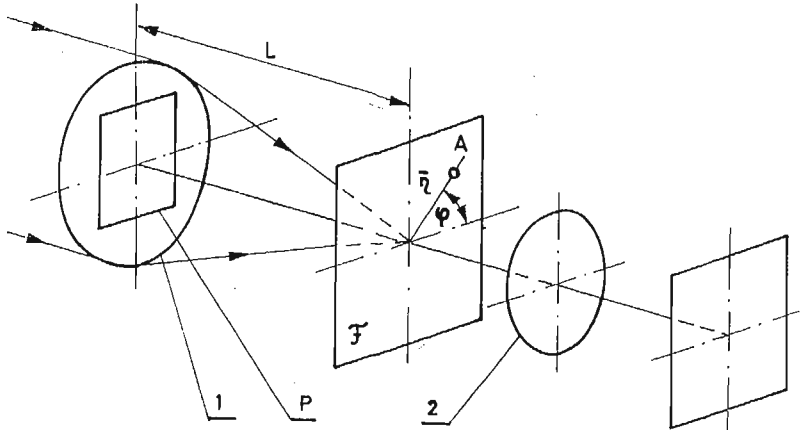


Rys. 4

W przypadku, gdy przystępując do pomiaru znamy już kąt „ α ” do wyznaczenia przemieszczeń wystarczy jeden oświetlacz plamkowy. Gdy oś optyczna aparatu fotograficznego jest prostopadła do powierzchni obiektu powyższy wzór przyjmuje postać

$$x_n = y \cot \beta. \quad (6)$$

Wyznaczone przemieszczenie „ x_n ” nie jest przypisane żadnemu konkretnemu punktowi obiektu, lecz jest średnią wartością normalnych do jego powierzchni składowych przemieszczeń punktów odpowiadających prześwietlanemu wiązka lasera fragmentowi specklogramu. Dokładność pomiaru metodą „punktową” zależy więc od gradientu przemieszczeń i średnicy wiązki analizującej. Jeśli przedmiot jest płaski, a jego wymiary są znacznie mniejsze od odległości od oświetlacza można analizy przemieszczeń dokonać metodą połową, podobnie jak dla specklogramów laserowych. Przykład układu optycznego służącego do tego celu, stosowanego m.in. przez Chianga i Bełzowskiego przedstawia rys. 5. Równoległa wiązka światła, niekoniecznie spójnego, skupiona jest w płaszczyźnie „ F ” przez



Rys. 5

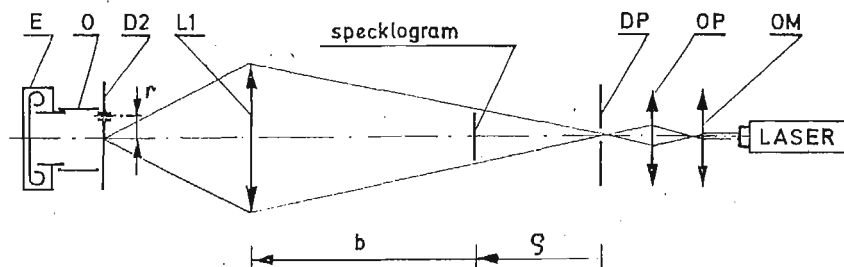
soczewkę 1. W tej samej płaszczyźnie umieszczona jest przesłona z małym otworkiem kołowym w punkcie A . Między przesłoną, a soczewką 1, w odległości L od przesłony znajduje się specklogram „ P ” badanego obiektu. Soczewka 2 odwzorowuje obraz przeźroczca „ P ” na błonie filmowej. Ponieważ na specklogramie zarejestrowane są dwie, przesunięte względem siebie struktury plamkowe pełniące rolę siatki dyfrakcyjnej (a ściślej mówiąc zbioru mini-siatek) rozczepia on przechodzącą wiązkę świetlną w szereg wiązek skupionych w płaszczyźnie ogniskowej „ i ” w punktach o współrzędnych

$$\eta_n = \frac{n \cdot \lambda \cdot L}{y \cdot M} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \bar{\eta}_n \perp \bar{y}. \quad (7)$$

Wprowadzenie w płaszczyźnie „ i ” przesłony z małym otworkiem w punkcie A powoduje, że na błonie filmowej mogą być zarejestrowane tylko te obszary obrazu przedmiotu, dla których ugięta przez specklogram wiązkę świetlną przechodzi przez punkt A , tzn. których składowa przemieszczenia y w kierunku prostopadłym do $\bar{\eta}_A$ wynosi

$$y_n = \frac{n \cdot \lambda \cdot L}{r \cdot M} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (8)$$

Widoczne są one w postaci układu jasnych prążków (warstwic przemieszczeń). Liczbę całkowitą „ n ” nazywamy rzędem prążka. Aczkolwiek opisany układ stosowany bywa z powodzeniem do analizy specklogramów laserowych, w przypadku metody projekcyjnej nie daje on układów prążkowych wysokiej jakości. Na przeszkodzie stoją tu małe wymiary (kątowe) przeźroczca, duże przemieszczenia, stosowanie materiałów fotograficznych niższej jakości (ziarnistość, chropowatość podłoża, niejednorodność warstwy emulsji). Zadowalające rezultaty przynosi natomiast zastosowanie układu (rys. 6), w którym soczewka transformująca $L1$ pełni równocześnie rolę obiektywu odwzorowującego obraz. W skład przedstawionego na rys. 6 i stosowanego przez autorów koherentnego procesora polowego wchodzi: Laser LG-600, OM — obiektyw mikroskopowy $\times 10$, OP — obiektyw powiększalnikowy „Amar S”, DP — pinhol o średnicy ok. 0,01 mm $L1$ — soczewka $f+400$, $\phi G4$, D2 — przesłona otworowa lub szczelinowa, O — osłona, E — lustrzanka małoobrazkowa



Rys. 6

Zenith „E” bez obiektywu. Średnica otworka w przesłonie D2 nie może być mniejsza niż 1 mm ze względu na silne plamkowanie obrazu przezrocza. W analizie przemieszczeń płaskich powierzchni korzystniejsze jest zastosowanie przesłony szczelinowej o szerokości 0,5÷1 mm i długości 5-15 mm. Prowadzi ono do skrócenia czasu naświetlania, polepszania kontrastu prążków oraz, dzięki większej jasności obrazu, ułatwia jego obserwację na matówce aparatu fotograficznego. Zasada działania opisanego układu jest podobna, jak przedstawionego na rys. 3, a poszczególnym prążkom zarejestrowanej struktury odpowiadają przemieszczenia:

$$y = \frac{n \cdot \lambda f^*}{M \cdot \eta} \quad \text{gdzie } n = 1, 2, \dots, \quad (9)$$

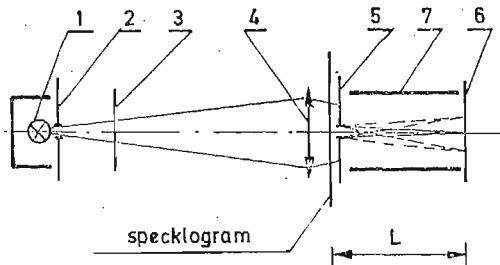
$$f^* = \frac{e \cdot f}{b + e - f} \quad (10)$$

Wyprowadzenie wzoru 10 zawiera praca [5]. Bardzo dobre wyniki można uzyskać dokonując połowej analizy specklogramów otrzymanych metodą projekcyjną przy pomocy niekoherentnych procesorów optycznych.

2. Stosowana aparatura

W skład oświetlacza plamkowego (rys. 1) wchodzi: 1 — oświetlacz halogenowy; 2 — kondensator f 200 \varnothing 110 mm; 3 — wykonana mechanicznie metodą piaskowania jednostronna matówka szklana 150×210 mm; 4 — przesłona irysowa; 5 — obiektyw f 400 \varnothing 64 mm; 6 — obudowa, 7 — płytka płaskorównoległa. Obudowa jest nieprzepuszczalna dla światła, ale zapewnia chłodzenie żarówki halogenowej. Matówka i obiektyw mają możliwość obrotu wokół osi pionowej, co ułatwia „ostre” odwzorowanie struktury plamkowej przy nieprawidłowym oświetleniu powierzchni obiektu. Zgodnie bowiem z twierdzeniem Scheipfluga-Czapskiego najlepszą jakość rzutowanego obrazu uzyskamy wtedy, gdy płaszczyzny: przezrocza — matówki, soczewki obiektywu i płaszczyzny stycznej do powierzchni obiektu przecinają się wzdłuż jednej prostej. Zastosowanie matówki umożliwia odwzorowanie struktury plamkowej na powierzchniach o dowolnym kształcie przy stosunkowo niewielkich stratach energii świetlnej i małych wymiarach pojedynczej plamki. Głębokość ostrości odwzorowania i wielkości plamek można w pewnym zakresie regulować poprzez zmianę przesłony aperturowej 4. Zastosowanie przesłon dwuszczylinowych poprawia

kontrast plamek, prowadzi jednak do zmniejszenia głębi ostrości. Umieszczona przed obiektywem płytka płaskorównoległa 7 posiada możliwość obrotu wokół osi poziomej i jest pomocna przy określaniu małych przemieszczeń metodą kompensacyjną. Wstawienie w miejsce żarówki halogenowej palnika lampy błyskowej lub stroboskopowej umożliwia pomiar przemieszczeń dynamicznych i drgań.



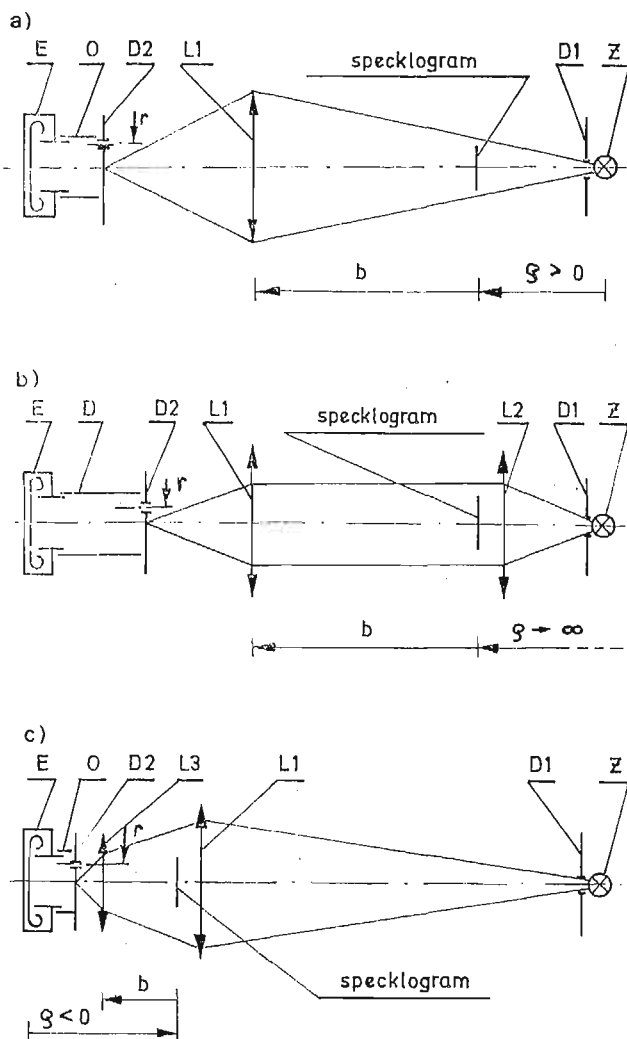
Rys. 7

W skład niekoherentnego analizatora punktowego (rys. 7) wchodzi: 1 — żarówka; 2 — przesłona szczelinowa o szerokości ok. 2 mm; 3 — filtr barwny; 4 — soczewka transformująca $f+400 \text{ } \varnothing 64 \text{ mm}$; 5 — przesłona otworowa $\varnothing 1 \div 4 \text{ mm}$; 6 — matówka lub błona filmowa; 7 — osłona. Ilość otrzymanych prążków, a więc i dokładność przyrządu, zależy od rodzaju filtru i dla wysokoselektywnych filtrów fotograficznych dochodzi do 15-stu. Bez filtru można otrzymać 5 - 8 prążków. Rodzaj żarówki i jej odległość od soczewki transformującej dobierano w ten sposób, by obraz włókna odwzorowany na błonie filmowej lub matówce był mniejszy niż szerokość prążka. Podobnie jak dla analizatora koherentnego wielkość przemieszczenia opisana jest wzorem 3.

Schematy stosowanych przez autorów niekoherentnych analizatorów połowych przedstawia rys. 8.

Przesłony szczelinowe D_1 i D_2 oraz włókno żarówki są do siebie równoległe. Szerokość szczeliny D_2 odpowiada szerokości obrazu włókna żarówki. Wszystkie przedstawione układy dają obrazy prążkowe wysokiej jakości, różnią się natomiast jasnością obrazu i czułością. Przemieszczenie, odpowiadające poszczególnym prążkom opisane jest wzorem 9. Zauważmy, że odległość między warstwicami określonej barwy jest — przy tym samym gradiencie przemieszczenia — proporcjonalna do długości fali. Każdej długości fali odpowiada więc inna struktura prążkowa. Nałożone na siebie dają one charakterystyczny wielobarwny obraz, przypominający obrazy elastoptyczne. Przemieszczeniu zerowemu odpowiada prążek czarny lub szary.

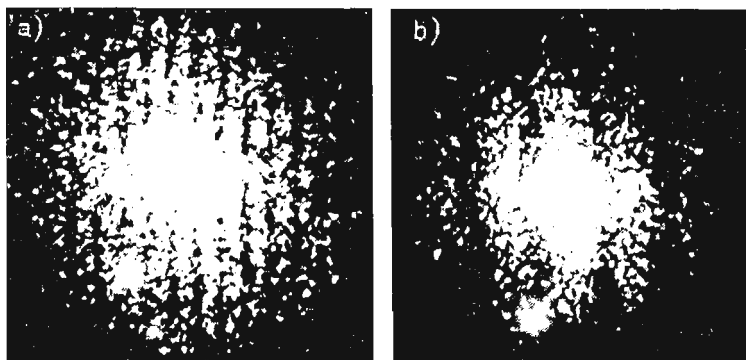
Zastępując w układzie „8c” soczewkę $L1$ obiektywem „Ketar” $f 135 \text{ n } 3$ otrzymano przenośny analizator specklogramów o długości 90 cm. Może on pracować jako układ połowy lub po usunięciu obiektywu $L3$ i przesłony $D2$ jako analizator punktowy. Błąd pomiaru przy pomocy analizatora przenośnego jest kilkakrotnie większy (ok. $6 \times$) niż w układach przedstawionych wyżej.



Rys. 8

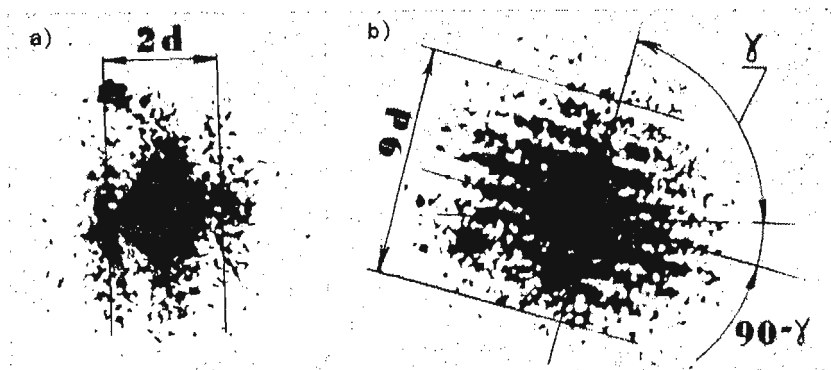
3. Przykład zastosowania metody projekcyjnej

Przydatność metody punktowej sprawdzono na przykładzie sztywnej płyty o wymiarach $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ obracanej o niewielki kąt wokół osi pionowej. Jako oświetlacza punktowego użyto tu rzutnika „Profil S” z obiektywem 85 mm, zmodyfikowanego w sposób opisany wyżej. Wartości przemieszczeń poszczególnych punktów określone na podstawie specklogramów różniły się od rzeczywistych o $0,5 \div 4\%$, przy czym większa wartość błędu odpowiada mniejszym przemieszczeniom. Błąd popełniany przy analizie specklogramów przy pomocy punktowych procesów niekoherentnych był tego samego rzędu, ale zakres pomiarowy zmniejszył się dwukrotnie. Obrazy prążkowe odpowiadające różnym przemieszczeniom przedstawia rys. 9. Modelem, na którym sprawdzono oświetlacz plamkowy była pomalowana białą farbą emulsyjną płyta ze szkła organicznego o grubości 3 mm i wymia-



Rys. 9

rach 420×420 mm, utwardzona na brzegu i obciążona punktowo na końcu boku przeciwnego. Odległość płyty od oświetlacza wynosiła 2,5 m, a kąt między jego osią, a powierzchnią płyty 45° . Oś aparatu fotograficznego była prostopadła do płyty. Specklogram rejestrowano na mikrofilmie negatywnym „Super-orto” wywołanym w 5% wywołaczu Rodinal R09 i utrwalanym w utrwalaczu uniwersalnym U1. Zakres pomiarowy przy analizie specklogramów punktowym procesorem koherentnym wynosił $0,8 \div 12$ mm, a błąd

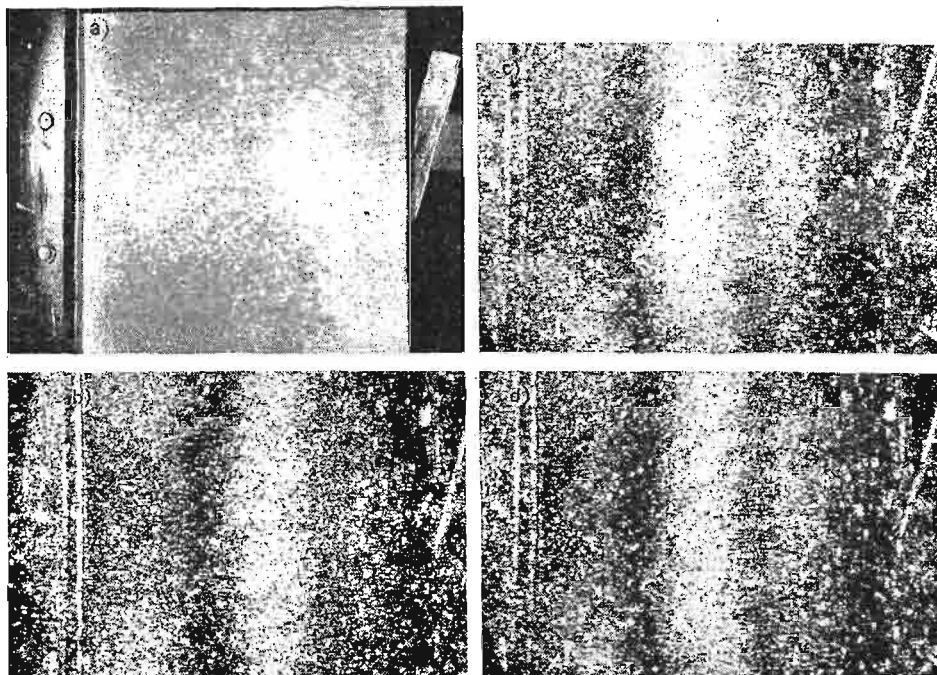


Rys. 10

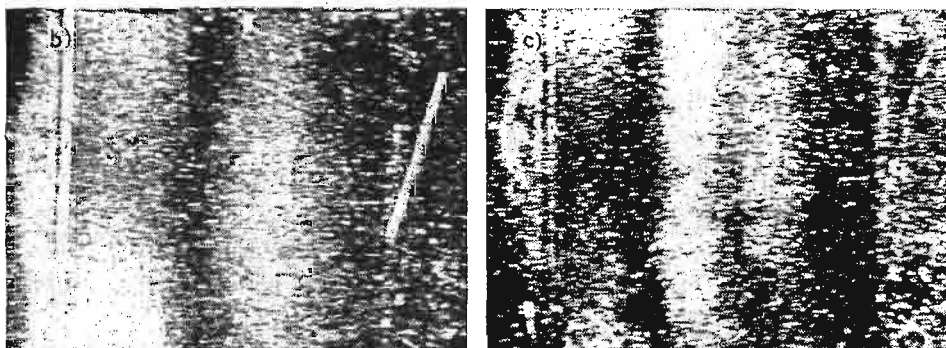
pomiarowy zawierał się w granicach $0,5 \div 3\%$. Obrót między ekspozycjami płytki płasko-równoległej umieszczonej przed obiektywem oświetlacza o kąt zapewniający pionowe przemieszczenie rzutowanych plamek o ok. 1 mm pozwolił na obniżenie dolnej granicy zakresu pomiarowego do ok. 0,1 mm i ograniczenie błędu pomiarowego do 0,5% w całym zakresie pomiarowym. Wartości przemieszczeń opisane są w tym przypadku wzorem;

$$x = y = \frac{f \cdot \lambda}{M \cdot d} \cos \gamma$$

γ — kąt nachylenia do poziomu
normalnej do prążków



Rys. 11 a) Dwuekspozycyjna fotografia badanej płyty (specklogram) b, c, d) Warstwy przemieszczeń otrzymane w koherentnym procesorze polowym przy różnych położeniach szczeliny filtrującej częstości przestrzenne.



Rys. 12 Warstwy przemieszczeń otrzymane przy pomocy procesora z żarowym źródłem światła.

Zauważmy, że $\cos \gamma$ może przyjmować wartości dodatnie i ujemne. Wprowadzenie wstępnego przemieszczenia plamek umożliwia (niestety tylko dla płyt) określenie zwrotu przemieszczenia obiektu. Sposób wyznaczania na podstawie struktury prążkowej otrzymanej w analizatorze punktowym odległości między prążkami „ d ” i kąta „ γ ” przedstawia rys. 10. Przykłady struktur prążkowych otrzymanych przy pomocy koherentnego analizatora połowego z przesłoną szczelinową 0,7 mm pokazano na rys. 11, a wyniki analizy tego samego specklogramu w świetle białym przy użyciu układu z rys. 8a przedstawia rys. 12. Zamieszczone obrazy można traktować jako wykresy warstwiczne ugięć płyty zamocowanej i obciążonej w opisany wyżej sposób.

4. Wnioski i uwagi

Metoda białych plamek projekcyjnych umożliwia punktowy pomiar normalnej do powierzchni obiektu składowej przemieszczenia płyt i mało wyniosłych powłok z dokładnością do 0,02% ich maksymalnego wymiaru liniowego, który może dochodzić do kilku metrów. Pomiar metodami połowymi ma, ze względu na małą ilość obserwowanych prążków i błędy spowodowane rozbieżnością wiązki oświetlającej, charakter raczej jakościowy niż ilościowy. Układy służące do rejestracji i analizy specklogramów mogą być wykonane niewielkim kosztem z elementów dostępnych na krajowym rynku fotograficznym. Szeroki zakres dopuszczalnych wymiarów obiektów, łatwość przygotowania ich do badań, stosunkowo duża dokładność pomiarów i łatwość interpretacji ich wyników, bezkontaktowy charakter pomiaru, duża ilość informacji zawartych w pojedynczym specklogramie i jego małe wymiary, możliwość stosowania tanich, krajowych materiałów fotograficznych oraz taniść i dostępność aparatury przemawiają za szerszym zastosowaniem metody zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych. Do jej wad zaliczyć trzeba konieczność pracy w zaciemnieniu, dość wąski zakres pomiarowy uzależniony każdorazowo od parametrów oświetlacza, czasochłonną obróbkę fotograficzną przezrocza.

Literatura cytowana w tekście

1. E. ARCHBOLD, A. E. ENNOS, *Displacement measurement from double-exposure laser photographs*, Opt. Acta, 19, 253 - 271.
2. W. BACHMACZ, J. PISAREK, *Wyznaczanie statycznych i dynamicznych przemieszczeń dużych obiektów metodą interferometrii plamkowej*, IX Symp. Badań Dośw. w Mechanice Ciała Stałego” Warszawa 24 - 27.IX.1980.
3. A. BÉLZOWSKI, M. KASPRZAK, *Zastosowanie interferometrii plamkowej z rekonstrukcją połową w badaniach nieniszczących* IX Symp. Badań Dośw. w Mechanice Ciała Stałego. Warszawa 24 - 27.IX.1980.
4. J. M. BURCH, J. M. TOKARSKI, Opt. Acta 15 No2, 101/1968.
5. W. T. CATHEY, *Optyczne przetwarzanie informacji i holografia*, PWN, Warszawa 1978.
6. CHIANG, Asundi — Applied optics, 19 No 14 s. 152 July 1980.
7. F. P. CHIANG, R. JUANG, *Laser speckle interferometry for plate bending problems*, Appl. Opt. Vol. 15 No 9 (1976).
8. *Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń*, pod redakcją Z. ORLOSIA. rozdz. 7. A. BUTT-HUSSAIM: *Metody mory*. PWN, Warszawa 1977.
9. A. J. DURELLI, V. J. PARKS, *Moiré Analysis of Strain* Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1970.

10. R. K. ERF, *Speckle metrology*, Academic Press, New York 1978.
11. C. FORNO, *White light speckle photography for measuring deformation strain and shape*, Opt. and laser technology, oct. 1975.
12. N. FERNELIUS, C. TOME, J. opt. Soc. Am. 6, 559.
13. M. FRANCON, *Optika spjekwov*, Izd. Mir, Moskwa 1980.
14. H. GIGER, Opt. Acta 15 nr 5 s. 511, 1968.
15. JOGEUX, Appl. Optics 15, s. 1241 - 1248, 1976.
16. M. KASPRZAK, *Interferometria plamkowa w zastosowaniu holografii do badań nieniszczących*. Pr. Nauk. Inst. Fiz. P. Wr. Seria: SPR Nr 36/80 Wroclaw 80, s. 128 - 158.
17. M. MATCZAK, *Metoda plamkowa w: Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń*, PWN, W-wa 1977.
18. E. MRÓZ, *Technika plamkowa — jej porównanie z interferometrią holograficzną i techniką mory w: Holografia optyczna*. PWN, W-wa 1980.
19. V. J. PARKS, *The range of speckle metrology*. Exp. Mech. June 1980.
20. L. M. ROGERS, *Noncoherent Optocal Processing*, Willey and Sons 1977.
21. H. J. TIZIANI, Opt. Commun. 5. 271, 1972.
22. W. VOCKE, K. ULLMANN, *Experimentelle Dehnungsanalyse*, Dehngitter und Moireverfahren VEB Fachbuchverlag, Lipsk 1974.

Р е з ю м е

АНАЛИЗ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МЕТОДОМ СПЕКЛОВ (ПЯТНИСТЫХ СТРУКТУР)
В БЕЛОМ СВЕТЕ

В работе представлен новый вариант метода спеклов. Пятнистая структура, получена с помощью матового стекла проектируется на поверхность исследуемого объекта. На основании фотографий объекта до- и после нагружения определяются перемещения. К анализу спектрограмм применено некогерентные оптические прецессоры.

S u m m a r y

DISPLACEMENT OF SURFACE BY WHITE SPECKLE PHOTOGRAPHY

The new method of speckle photography is presented. The white speckle patterns are created by ground glass and projected onto the surface of the tested object. Displacement of the surface can be measured by recording a double — exposure photography of the object illuminated by speckle — projector, followed by optical processing of the recorded speckle pattern image. The analysis can be performed either point — by — point technique, or by spatial filtering technique which resolves the motion in direction perpendiculary to object surface. Noncoherent optical processors are used to analyse speckle pattern image.

Praca została złożona w Redakcji dnia 7 maja 1981 roku