

## BADANIA ELASTOOPTYCZNE MODELI PŁASKICH Z WYKORZYSTANIEM HOLOGRAFII

WOJCIECH ŚWISTERSKI (KRAKÓW)

### 1. Wstęp

W połowie lat sześćdziesiątych, gdy rozwinięto techniki holograficzne, zaczęto stosować je w dziedzinie doświadczalnej analizy naprężeń i odkształceń. Jedną z najczęściej stosowanych do analizy naprężeń i odkształceń technik holograficznych jest interferometria.

Zasada interferometrii holograficznej została opisana w szeregu artykułach, [10, 12], także w kraju [13, 17].

Nową technikę interferometrii można z powodzeniem zastosować w pierwszej i najstarszej spośród metod doświadczalnej analizy naprężeń i odkształceń — w metodzie elastoptycznej. Jak wiadomo, wykorzystuje ona światło spolaryzowane do badania rozkładu naprężeń i odkształceń w modelach płaskich lub przestrzennych. Połączenie interferometrii holograficznej z elastoptyką, lub, inaczej mówiąc, wprowadzenie elastoptyki do interferometrii holograficznej, pozwala w większym stopniu wykorzystać falę świetlną jako nośnik informacji.

Pełny opis fali świetlnej wymaga podania amplitudy, fazy częstości, stanu polaryzacji i kierunku propagacji. Wszystkie te parametry można wykorzystać jako nośniki informacji. W elastoptyce konwencjonalnej rejestruje się:

- a) rozkład amplitudy,
- b) częstość (lub długość fali),
- c) stan polaryzacji,
- d) kierunek polaryzacji.

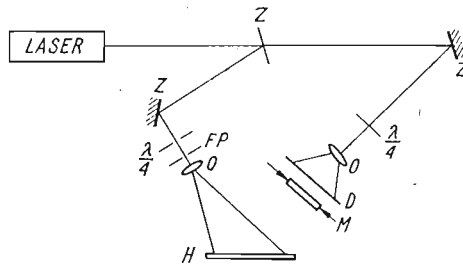
Przy dysponowaniu spójnym źródłem fali świetlnej — laserem, rejestracja fazy daje możliwość zapisania i odtworzenia interferencyjnych obrazów przestrzennych.

Pierwsze próby zastosowania interferometrii holograficznej w elastoptyce dotyczą badania płaskich modeli typu tarcz, w świetle przechodzącym.

O ile konwencjonalne techniki elastoptyczne dostarczają informacji o izoklinach i izochromach w płaskim modelu, wykonanym z tworzywa wykazującego dwójłomność wymuszoną, to interferometria holograficzna wzbogaca tę informację o izopachy, umożliwiając w ten sposób wyznaczenie całkowitego stanu naprężenia w każdym punkcie modelu.

## 2. Badanie modelu znajdującego się w płaskim stanie naprężenia

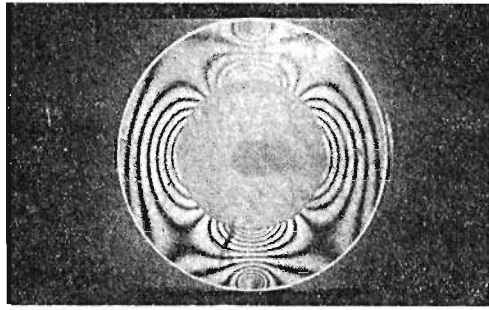
W celu uzyskania obrazu izopach użyto stanowiska, którego schemat zamieszczono na rys. 1. Przedstawiony układ służy do rejestracji hologramów obiektów fazowych. Użyty tu laser helowo-neonowy został wykonany w Laboratorium Instytutu Fizyki UJ w Krakowie. Jego moc wynosi ok. 4 mW przy pracy w modzie TM<sub>00</sub>, a długość wypromieniowanej fali świetlnej wynosi 6328 Å. Wiązka światła laserowego jest liniowo spola-



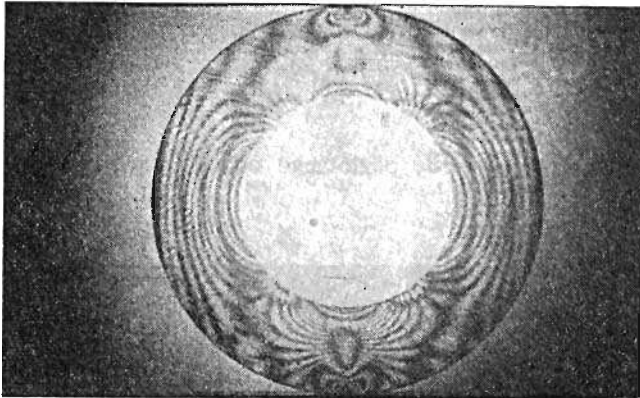
Rys. 1

ryzowana w płaszczyźnie prostopadłej do stołu holograficznego. Na drodze wiązek, przedmiotowej i odniesienia, umieszczono liniowe ćwierćfalówki zorientowane tak, by wytwarzały światło spolaryzowane kołowo i by skrętność polaryzacji obu wiązek była taka sama. Obiekt *O* służy do nadania wiązce światła laserowego takiej rozbieżności, by na matówce (dyfuzor *D*) uzyskać plamę stanowiącą tło dla modelu *M*. Do badań użyto dwu modeli w formie płaskich jednakowych pierścieni o wymiarach: średnice:  $D = 71$  mm,  $d = 38,5$  mm, grubość  $g = 6$  mm. Pierścień z żywicy Epidian 2 — czulej optycznie służył do uzyskania jednoczesnego obrazu izochrom i izopach (rys. 3), zaś pierścień ze szkła organicznego, metapleksu do uzyskania obrazu samych izopach (rys. 2). Obrazy na rys. 2 i 3 uzyskano metodą dwukrotnej ekspozycji: przy modelach odciążonych i obciążonych siłami skupionymi działającymi wzdłuż pionowych średnic modeli. Do ekspozycji użyto płyt holograficznych AGFA-Gevaert 10 E 75. Wszystkie elementy układu holograficznego (stół, uchwyty) nie wchodzi w skład żadnego z zestawów holograficznych dostępnych w handlu, lecz zostały sporządzone w charakterze prototypów. Wiązka odniesienia, spolaryzowana tak samo jak przedmiotowa, odpowiada analizującemu filtrowi w polaryskopie, w tym wypadku z jasnym polem widzenia. Obraz elastoptyczny powstający w modelu jest widoczny dopiero w procesie rekonstrukcji, przy obserwacji obrazu urojonego. Na rys. 2 przedstawiono model z metapleksu obciążony siłą  $P = 20$  kp. Izopachy są liniami wyraźnie zarysowanymi i kontrastowymi. Ze względu na niską czułość optyczną metapleksu izochromy nie występują. Na rys. 2 istnieje pionowa oś symetrii, a brak poziomej. Zniekształcenie to spowodowane jest błędem liniowych ćwierćfalówek\*).

Dyskusję wpływu błędu od liniowych płytek opóźniających podaje AJOVALASIT [15]. Ponadto na rys. 2 zarys izopach, w okolicy górnego punktu przyłożenia siły, jest mniej wyraźny. Wynika to z faktu jego przemieszczenia się podczas obciążenia. Dolny punkt przyłożenia siły jest nieruchomy.



Rys. 2



Rys. 3

Ustawienie matówki na drodze światła spójnego i spolaryzowanego niewątpliwie pogarsza spójność światła padającego na model, jak również obniża stopień jego polaryzacji. Fotografie 2 i 3 pokazują, że ów niekorzystny wpływ nie jest na tyle silny, by uniemożliwić interpretację obrazów.

Na rys. 3 przedstawiono pierścien z rys. 2. Fotografia ta różni się od poprzedniej obrazem izochrom, nałożonym na obraz izopach i modyfikującym go.

W otoczeniu (tzn. obszarze modelu od  $m - 1/2$  do  $m + 1/2$ ) izochrom o rzędach  $m$  całkowitych parzystych, izopachy ciemne mają rzędy półówkowe, natomiast w otoczeniu izochrom o rzędach całkowitych nieparzystych ciemnym izochrom należy przyporządkować rzędy całkowite. Powstawanie tego zjawiska w elastoptyce holograficznej wyjaśnili FOURNEY i MATE, [7], a wcześniej NISIDA i SAITO, [18], przy użyciu interferometrii konwencjonalnej. Autorzy ci wyprowadzili wzór na rozkład natężenia światła w obrazie interferometryczno-elastoptycznym, który po przyjęciu niewielkich uproszczeń, można przedstawić w następującej postaci:

$$(1) \quad J = 1 + 2\cos m_p \tau \cos m\pi + \cos^2 m\tau$$

\*<sup>o</sup> Ćwierćfalówki liniowe do światła laserowego ( $\delta = 1582 \text{ \AA}$ ) Producent: HSB Meakin Ltd 9 Tredown Rd London SE26 5QQ

gdzie  $m$  — rząd izochromy,  $m_p$  — rząd izopachy.

a) Jeżeli  $m = \pm 2k$ , gdzie  $k = 0, 1, 2 \dots$  (otoczenie izochrom parzystych), to wzór na rozkład natężenia światła na płycie holograficznej ma postać

$$(2) \quad J = 2 + 2\cos m_p \pi$$

b) Jeżeli  $m = \pm(2k+1)$  gdzie  $k = 0, 1, 2 \dots$  (obszar izochrom nieparzystych), to wzór (1) przyjmuje postać

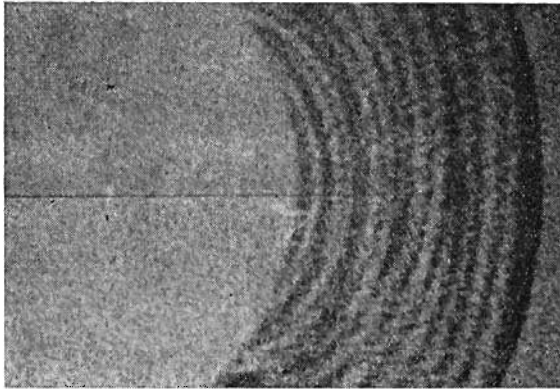
$$(3) \quad J = 2 - 2\cos m_p \pi$$

c) Jeżeli  $m = \pm \frac{(2k+1)}{2}$ , gdzie  $k = 0, 1, 2 \dots$  (miejsce, gdzie występuje izochroma półkrowa — ciemny prążek), to wzór (1) przyjmuje postać

$$(4) \quad J = 1,$$

co oznacza, że izopachy znikają.

Rys. 4. przedstawia powiększenie poziomego odcinka średnicy pierścienia pokaza-



Rys. 4

nego na rys. 3: Brak symetrii względem poziomej średnicy nie jest przeszkodą dla zmierzzonego rozdzielania naprężeń głównych wzdłuż tej średnicy, bowiem nie analizuje się kąta nachylenia linii izopach do rozpatrywania przekroju. Na podstawie fotografii z rys. 4, przy uwzględnieniu anomalnego obrazu izopach, możliwe jest rozdzielanie naprężeń w przekroju poziomym. Prawo elastooptyczne można przyjąć w postaci

$$(5) \quad \sigma_1 - \sigma_2 = m,$$

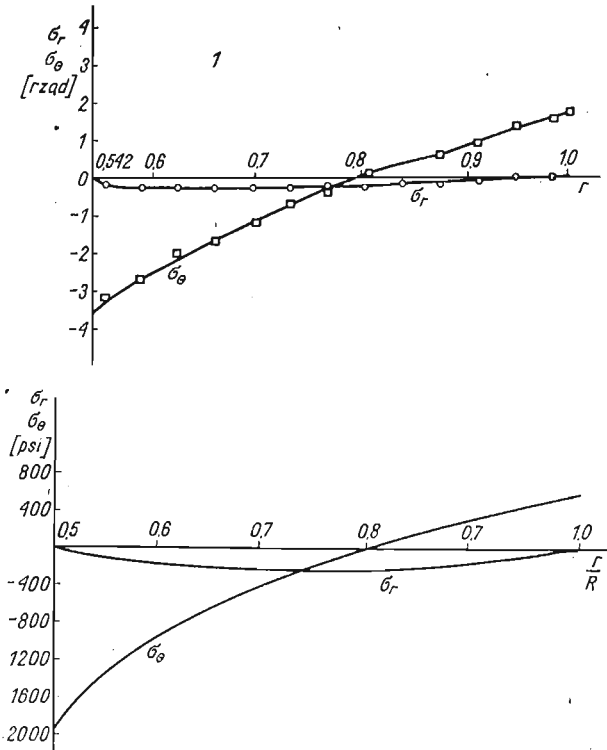
zaś informację uzyskaną z obrazu izopach przedstawić następująco

$$\sigma_1 + \sigma_2 = m_p.$$

Na zewnętrznym, nieobciążonym brzegu, zarówno rząd izopachy jak i rząd izochromy wskazują tę samą wartość naprężenia głównego, a zatem równanie izopach można też napisać w postaci

$$(6) \quad \sigma_1 + \sigma_2 = km,$$

gdzie  $k > 1$ , co widać na fotografiach, gdyż prążki izopach są gęstsze. Równania (5) i (6) można rozwiązać ze względu na  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  dla dowolnie wielu punktów badanego prze-

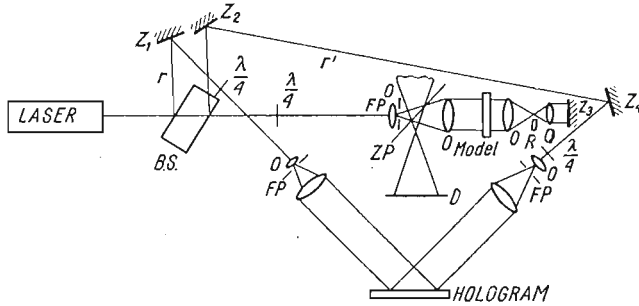


Rys. 5a i b

kroju, a znalezione ich wartości nanieść na wykres w jednostkach rzędu izochrom. Wykres taki przedstawiono na rys. 5a. Na rys. 5b pokazano, dla porównania, teoretyczny wykres  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ , bądź  $\sigma_r$  i  $\sigma_\theta$  dla pierścienia o stosunku średnic  $D/d = 2$ . W niniejszych doświadczeniach stosunek ten wynosił 1,85. Charaktery obu wykresów są podobne.

### 3. Otrzymywanie izochrom i izopach niezależnie

Układ stanowiska, na którym możliwe jest otrzymywanie oddzielnych obrazów izochrom i izopach, przedstawia rys. 6. Jest to układ o 2 wiązkach odniesienia. Wiązka światła liniowo spolaryzowanego przechodzi przez szklany blok, spełniający rolę płytki światłodzielną. Obie powierzchnie płytki odbijają część światła, dla obu wiązek odniesienia oznaczonych  $r$  i  $r'$ . Są one spolaryzowane kołowo, mają tę samą skrętność i, pada-



Rys. 6

jąc na płytę holograficzną pod różnymi kątami, zapewniają separację przestrzenną ugiętych fal w procesie rekonstrukcji. Podczas pierwszych dwóch ekspozycji używa się jedynie jednej z wiązek odniesienia np.  $r$ . Kołową półfalówkę, która obraca płaszczyznę polaryzacji światła eliptycznie spolaryzowanego o  $90^\circ$ , a nie zmienia stanu polaryzacji światła kołowo spolaryzowanego, umieszcza się tak, by jedynie wiązka, odbijająca się od zwierciadła  $Z_3$  i wchodząca ponownie do modelu, przechodziła przez nią. Powoduje to eliminację izochrom, ponieważ każda z dwóch składowych promienia, rozchodzącego się w modelu wzdłuż kierunków naprężeń głównych, doznaje opóźnień  $a_1$  i  $a_2$ , a przy ponownym przejściu  $a_2$  i  $a_1$ , gdzie indeksy 1 i 2 są związane z kierunkami głównymi. Kołowa półfalówka wykonana jest z kryształu kwarcu, tak, by oś optyczna była prostopadła do jego płaszczyzny, a światło przechodziło równoległe do osi optycznej.

Trzeciej ekspozycji dokonuje się przy modelu obciążonym identycznie jak dla ekspozycji drugiej, przy użyciu wiązki odniesienia  $r'$  i usuniętej kołowej półfalówce. Składowe wiązki przedmiotowej doznają opóźnień względnych  $2a_1$  i  $2a_2$ , ponieważ wiązka zachowuje ten sam stan polaryzacji przy dwukrotnym przejściu modelu.

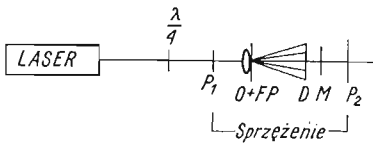
Jeżeli podczas rekonstrukcji użyjemy wiązki  $r$ , to otrzymamy obraz izopach, przy użyciu zaś wiązki  $r'$  uzyskamy obraz izochrom, niezakłócony izopachami. Można także wykorzystać układ z rys. 3, przy użyciu tylko jednej wiązki odniesienia. Wówczas pomiędzy drugą a trzecią ekspozycją należy obrócić płytę holograficzną wokół osi leżącej w jej płaszczyźnie o pewien kąt, tak by było możliwe rozdzielanie dwu niezależnych od siebie obrazów, zarejestrowanych na płycie. Umieszczenie płyty, podczas rekonstrukcji, w położeniu, jakie zajmowała przy pierwszych ekspozycjach, dostarcza obrazu izopach, a w położeniu odpowiadającym trzeciej ekspozycji, dostarcza obrazu izochrom.

#### 4. Rejestracja obrazu izoklin

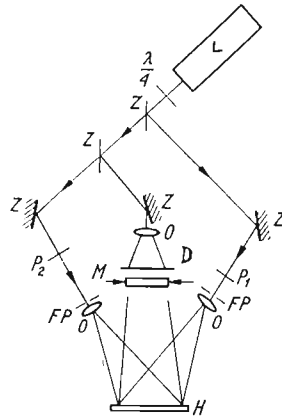
By rejestrować obraz izoklin można posłużyć się polaryskopem, który można otrzymać modyfikując następująco stanowisko przedstawione na rys. 7. Likwiduje się wiązkę odniesienia, a w wiązkę obiektową wstawia się dwa liniowe filtry polaryzacyjne skrzyżowane ze sobą i mechanicznie sprzężone:  $P_1$  za ćwierćfalówką i przed obiektywem, a  $P_2$  między model, a płytę holograficzną (rys. 7.). Jednocześnie obrót  $P_1$  i  $P_2$  dostarcza obserwatorowi

obrazu izoklin o parametrach określonych chwilowym położeniem  $P_1$  i  $P_2$ . Taki wariant rejestracji izoklin jest nieco sztuczny i może przysporzyć trudności interpretacyjnych ze względu na monochromatyczność światła i jednocześnie występowanie izochrom.

Innym holograficznym sposobem jest wykorzystanie spójności światła laserowego. W układzie z rys. 8 każda z dwóch wiązek odniesienia jest spolaryzowana liniowo, a ich



Rys. 7



Rys. 8

płaszczyzny polaryzacji są wzajemnie prostopadłe. Światło padające na model jest spolaryzowane kołowo, skrętność dowolna.

Układ pokazany na rys. 8 jest bardzo czuły na przesunięcia płyty holograficznej. Dla odtworzenia *a posteriori* obrazu izoklin należy wywołać płytę holograficzną nie ruszając jej z miejsca, jak to się dzieje przy holografowaniu w czasie rzeczywistym.

Obraz modelu wytworzony w procesie rekonstrukcji należy obserwować przez liniowy filtr polaryzacyjny. Stosownie do jego pozycji, izokliny o różnych parametrach widoczne są jako półszare linie, ponieważ w procesie rejestracji model oświetlony był światłem kołowo-spolaryzowanym.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań własnych autora oraz opisy stanowisk zaczerpnięte z literatury dają pogląd o obecnym stanie badań w dziedzinie elastoptyki holograficznej. Możliwe jest stosowanie kilku wariantów tej techniki badawczej:

a) uzyskiwanie w interferometrze holograficznym obrazu izopach oraz kojarzenie go z obrazem izochrom i izoklin, otrzymanym z konwencjonalnego polaryskopu.

b) Uzyskiwanie w interferometrze holograficznym jednocześnie obrazu izochrom i izopach oraz kojarzenie go z obrazem izoklin otrzymanym z polaryskopu konwencjonalnego, bądź zmodyfikowanego według rys. 7 stanowiska holograficznego.

c) Uzyskiwanie obrazów elastoptycznych sposobem „czysto holograficznym” w ukła-

dzie jak na rys. 6 i 8. Rejestracji izoklin można dokonać według zasady z rys. 8. Wtedy obie wiązki odniesienia muszą być liniowo spolaryzowane.

Stosując technikę elastooptyki holograficznej można osiągnąć wysoką dokładność pomiarów, które otrzymuje się na drodze prostszej, unikając doświadczalnych metod pomiaru zmian grubości modelu płaskiego lub stosowania przybliżonego całkowania dla znalezienia sumy naprężeń głównych.

#### Podziękowanie

Badania autora wykonane były w ramach problemu węzłowego nr. 06.2.3 pn. «Rozwój badań, opracowanie konstrukcji i budowa urządzeń laserowych».

Autor wyraża podziękowanie kol. mgr inż. TADEUSZOWI FEUEROWI za wiele cennych uwag merytorycznych, wykorzystanych przy prowadzeniu doświadczeń i redagowaniu niniejszej publikacji.

#### Literatura cytowana w tekście

1. M. M. FROCHT, *Photoelasticity*, Tom 1, 1941, Tom 2, 1948, J. Wiley Sons.
2. H. WOLF, *Spannungsoptik*, Springer, 1961.
3. C. E. TAYLOR, C. E. BOWMAN, W. P. NORTH, W. F. SWINSON, *Applications of lasers to photoelasticity*, *Exp. Mech.*, **6**, 6 (1966).
4. M. E. FOURNEY, *Application of holography to photoelasticity*, *Exp. Mech.*, **8**, 1 (1968).
5. E. HOSP, G. WUTZKE, *Die Anwendung der Holographie in der ebenen Spannungsoptik*, *Materialprüf.*, **11**, 12 (1969).
6. E. HOSP, G. WUTZKE, *Holographische Ermittlung der Hauptspannungen in ebenen Modellen*, *Materialprüf.*, **12**, 1 (1970).
7. M. E. FOURNEY, K. V. MATE, *Further applications of holography to photoelasticity*, *Exp. Mech.*, **10**, 5 (1970).
8. D. C. HOLLOWAY, R. H. JOHNSON, *Advancements in holographic photoelasticity*, *Exp. Mech.*, **11**, 2 (1971).
9. R. J. SANFORD, A. J. DURELLI, *Interpretation of fringes in stress-holo-interferometry*, *Exp. Mech.*, **11**, 4 (1971).
10. R. O'REGAN, T. D. DUDDERAR, *A new holographic interferometer for stress analysis*, *Exp. Mech.*, **11**, 6 (1971).
11. J. D. HOVANESIAN, *Elimination of isochromatics in photoholographic photoelasticity*, *Strain*, Oct. 1971.
12. S. K. DHIR, H. A. PETERSON, *An application of holography to complete stress analysis of photoelastic models*, *Exp. Mech.*, **11**, 12 (1971).
13. M. DASZKIEWICZ, *Holografia w świetle spolaryzowanym — elastooptyka holograficzna*, Ref. nr 7 z Konf. Nauk. nt. Holografia — jej zastosowania w nauce i technice, Warszawa 1973.
14. J. CERNOSEK, S. McDONALD, *On the effect of quarter-wave-plate errors in stress-holo-interferometry*, *Exp. Mech.*, **14**, 10 (1974).
15. A. AJOVALASIT, *Holographic photoelasticity: influences of inaccuracies of optical retarders on isochromatics and isopachics*, *J. Strain Anal.*, **9**, 1 (1974).
16. A. ASSA, A. A. BETSER, *A new method for the recording and independent reconstruction of the isopachic and isochromatic fringe patterns with a single hologram*, TAE Report 181, Technion I.I.T., Haifa 1973.
17. T. FEUER, M. J. MATCZAK, *Podstawy interferometrii holograficznej*, *Czasopismo Techniczne*, 4M (1973).
18. M. NISIDA, H. SAITO, *A new interferometric method of two-dimensional stress analysis*, *Exp. Mech.*, **4**, 12 (1974).



## Резюме

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ  
ФОТОУПРУГОСТИ

В работе приведены результаты экспериментов проведенных с целью получения изопах на плоском кольце, подвергнутом сжатию двумя сосредоточенными силами, действующими вдоль вертикального диаметра. Применен метод голографической фотоупругости. На основании экспериментальных данных разделены главные напряжения в симметричном сечении. Приведены выводы и сравнение экспериментальных данных с теоретическим решением. Представлено современное состояние знаний в области голографической фотоупругости.

## Summary

PHOTOELASTIC INVESTIGATION OF TWO-DIMENSIONAL MODELS BY MEANS OF  
HOLOGRAPHY

In the paper are shown the results of original experiments. They were carried out in order to obtain the isopachic fringe patterns on a plane ring subjected to two external forces acting along the vertical diameter. A method of holographic photoelasticity is applied. The experimental data obtained allowed the two principal stresses to be separated along the symmetry line. The conclusions are drawn and a comparison with the theoretical solution is made. The present state of knowledge in the field of holographic photoelasticity is reported.

INSTYTUT MECHANIKI I PODSTAW  
KONSTRUKCJI MASZYN  
POLITECHNIKA KRAKOWSKA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 23 stycznia 1976 r.*

---