

ROLA I METODY DOŚWIADCZALNEJ ANALIZY NAPRĘŻEŃ W ROZWIĄZYWANIU  
WSPÓŁCZESNYCH PROBLEMÓW MECHANIKI CIAŁA STAŁEGO\*)

JACEK STUPNICKI (WARSZAWA)

Postępujący w szybkim tempie rozwój przybliżonych metod obliczeniowych i rozwój metod symulacji na maszynach analogowych mogą wywołać wrażenie, że następuje zmierzch badań doświadczalnych. Prowadzenie pomiarów na rzeczywistych obiektach lub na modelach jest na ogół bardzo pracochłonne. Znacznie szybciej i taniej można obecnie wykonywać numeryczne i analogowe badania uzyskując wyniki, których dokładność, liczona w ułamkach procenta, zdaje się gwarantować ich niepodważalność. Nastąpił więc spadek zapotrzebowania ze strony przemysłu na prace usługowe, co ograniczyło fundusze laboratoriów. W krajach o wieloletnich tradycjach w dziedzinie badań doświadczalnych widoczne było zahamowanie rozwoju ośrodków badawczych.

Stagnacja w badaniach doświadczalnych nie trwała długo, ostatnie lata przynoszą wzrost zainteresowania badaniami doświadczalnymi o nieco innym charakterze niż poprzednio. Nie podejmuje się obecnie prac doświadczalnych, które można zastąpić analizą numeryczną. Rola współczesnych metod doświadczalnych uwydatnia się przede wszystkim w badaniach podstawowych. Ich pierwszoplanowa funkcja, to obserwacja nowych zjawisk lub zjawisk dotychczas nie zauważonych. Funkcja drugoplanowa, to weryfikacja prawdziwości założeń przyjętych podczas budowy modeli matematycznych i sprawdzenie dopuszczalności poczynionych uproszczeń.

W zakresie doświadczalnej analizy naprężeń badania doświadczalne są niezastąpione w zagadnieniach kontaktowych, w szeroko pojętych zagadnieniach dynamicznych układów o złożonej geometrii, w zagadnieniach lepkosprężystych, lepkoplastycznych lub w układach o własnościach anizotropowych. Stało się jasne, że dla harmonijnego rozwoju wszystkich dziedzin muszą być ożywione laboratoria i musi być przywrócone ich znaczenie.

Istnieje ogromna różnorodność metod doświadczalnych. Stając przed koniecznością dokonania wyboru metod wartych prezentacji na Sympozjum, przyjąłem zasadę omówienia tych, które okazały się w ostatnich latach najbardziej efektywne, lub tych, które roszą nadzieję nowych możliwości.

Stare metody badań mogą dać ciekawe informacje, jeśli zostaną użyte poza tradycyjnymi dziedzinami zastosowań. Jednakże na ogół nowe zadania wymagają zwykle nowych metod. Daje się zauważyć powszechną dążność w tym kierunku. W zakresie np. metod optycznych — wykorzystanie: efektu Kerra (dwójłomności w polu elektrycznym), efektu

\*) Referat przeglądowy wygłoszony na VI Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 19–20.IX.1974 r. Sprawozdanie z obrad Sympozjum jest zamieszczone w Biuletynie Informacyjnym niniejszego numeru MTiS.

Cotton–Moutona (dwójłomności w polu magnetycznym), efektu Faradaya (skręcenia płaszczyzny polaryzacji w polu magnetycznym).

Możliwość wciągnięcia dodatkowych pól fizycznych do badań trójwymiarowych stanów naprężeń dyskutował H. K. ABEN [1, 2]. Stwierdził on konieczność rozszerzenia klasy przypadków, które mogą być badane na polaryskopach, na modele przestrzenne o nieliniowej zmianie naprężeń wzdłuż osi przechodzącego promienia. Główną trudnością na tej drodze jest zbyt proste wyrażenie na opóźnienie fazowe głównych drgań opuszczających model

$$(1) \quad \delta = C \int_0^h (\sigma_1 - \sigma_2) dz.$$

Równanie (1) wyrażające ogólne prawo Wertheima wykazuje, że niemożliwe jest na bazie pomiarów optycznych (końcowych) otrzymanie informacji na temat rozkładu naprężeń wzdłuż drogi promienia.

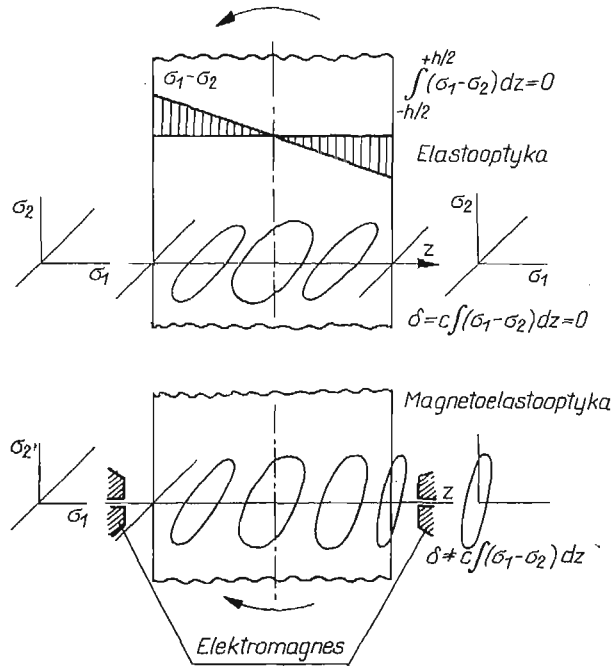
Jeśli w modelu zachodzi obrót głównych płaszczyzn polaryzacji spowodowany zmianą kierunku naprężeń głównych  $d\varphi/dz$  lub spowodowany dodatkowymi polami  $d\psi/dz$ , prawo Wertheima przestaje być prawdziwe. Równania elastooptyczne zawierające informacje na temat rozkładu naprężeń wzdłuż osi promienia mogą być wówczas wyrażone następująco [2]:

$$(2) \quad \begin{aligned} \frac{dE_1}{dz} &= i \frac{C}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) E_1 + \frac{d}{dz} (\varphi - \psi) E_2, \\ \frac{dE_2}{dz} &= -\frac{d}{dz} (\varphi - \psi) + i \frac{C}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) E_2, \end{aligned}$$

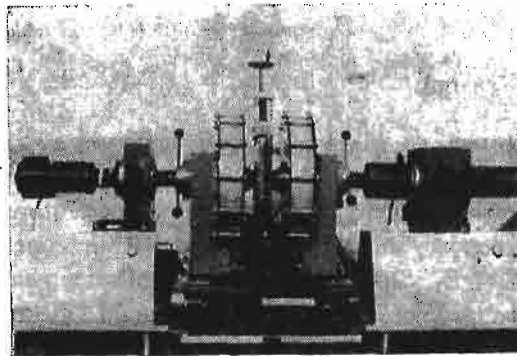
gdzie  $E_1$  i  $E_2$  oznaczają składowe wektora natężenia światła, o kierunkach naprężeń głównych  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ . Dlatego, wprowadzając sztucznie obrót płaszczyzny polaryzacji lub obrót kierunków głównych naprężeń, można badać trójwymiarowe stany naprężeń na polaryskopach transmisyjnych. H. K. ABEN rozważa możliwość uzyskania obrotu płaszczyzn polaryzacji przez stosowanie modeli o uprzednio zamrożonych polach naprężeń (metoda proponowana przez DRUCKERA w 1942 r. [4]), przez wykonanie modeli z optycznie aktywnych polimerów [5], które charakteryzują się zdolnościami skręcenia płaszczyzny polaryzacji bez istnienia naprężeń, oraz przez stosowanie silnych pól magnetycznych.

W kolejnej publikacji [3] ABEN podaje wartości naprężeń uzyskane podczas badania na magnetopolaryskopie płyty z otworem kołowym zginanej w płaszczyźnie osi otworu (rys. 1, 2). Otrzymane wartości współczynnika koncentracji naprężeń porównane z jedynym teoretycznym rozwiązaniem dla płyty nieskończonej i z szeregiem wyników doświadczalnych uzyskanych innymi metodami wykazują interesującą zbieżność.

Drugim przykładem poszukiwań nowych efektów, które mogą być wykorzystane w badaniach materii, jest praca S. PAUTHIER-CAMIER [6]. Autorka, poza rozpatrywaniem możliwości wykorzystania dodatkowych pól, zwraca uwagę na tak proste metody, jak: pomiar współczynnika załamania światła, pomiar absorpcji światła i pomiar dichroizmu. Są to metody dotychczas nie wykorzystywane, a mogące dostarczyć informacji o zmianach w strukturze materii, przy czym pomiarowy strumień światła nie wywołuje żadnych zniekształceń analizowanej struktury.



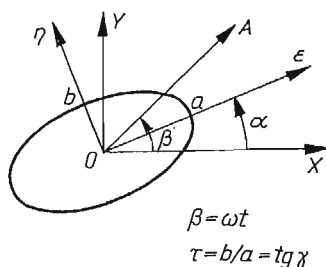
Rys. 1



Rys. 2

Prowadzone są poszukiwania sposobów uściślenia danych otrzymywanych z badań metodami uznanymi za tradycyjne. Przykładem może być tu praca J. EBBENI [7] na temat wyznaczania odkształceń złożonych, przestrzennych konstrukcji z materiałów nieprzezroczystych, o powierzchniach rozpraszających światło. Wiadomo, że dla takich konstrukcji uzyskane metodą holograficzną obrazy, poza nielicznymi przypadkami, są trudne do interpretacji. Wyznaczenie odkształceń jest wówczas niemożliwe. W proponowanej metodzie, przez zastosowanie kombinacji holografii i metody rastrów, autor uzyskał pola odkształceń tak złożonych struktur, jak szkielety kostne.

W zakresie automatyzacji pomiarów elastoptycznych uznanie zdobyła metoda elektro-  
nicznego pomiaru składowych eliptycznie spolaryzowanego światła [8]. Promień spolary-  
zowanego eliptycznie światła jest jednoznacznie określony przez stosunek półosi elipsy,  
orientację jednej z półosi oraz kierunek obrotu promienia. Zgodnie z oznaczeniami poda-  
nymi na rys. 3 dłuższa półoś elipsy tworzy kąt  $\alpha$  z poziomą osią układu odniesienia. Elip-



Rys. 3

tyczność promienia  $\tau = b/a = \operatorname{tg} \gamma$ . Energia światła przechodzącego przez analizator  
o płaszczyźnie polaryzacji  $OA$  tworzącej kąt  $\beta$  z osią  $x$  może być wyrażona jako

$$(3) \quad E = \frac{a^2 + b^2}{2} \left[ 1 + \frac{1 - \tau^2}{1 + \tau^2} \cos 2(\beta - \alpha) \right] = \frac{a^2 + b^2}{2} \left[ 1 + \cos 2\gamma \cos 2(\beta - \alpha) \right].$$

Jeśli analizator obracać ze stałą prędkością, to strumień światła przechodzącego można  
rozłożyć na dwa składniki: jeden o stałej energii

$$E_1 = \frac{a^2 + b^2}{2}$$

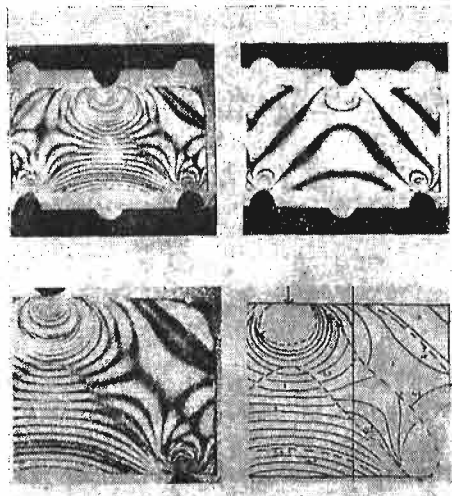
i drugi o zmieniającej się energii

$$(4) \quad E_2 = \frac{a^2 + b^2}{2} \left[ \frac{1 - \tau^2}{1 + \tau^2} \cos 2(\omega t - \alpha) \right].$$

Jeśli natężenie światła przechodzącego mierzyć za pomocą fotopowielacza, otrzymamy  
zmodulowany sygnał zawierający interesujące informacje. Mierzone dwa napięcia  $V_1$  i  $V_2$   
są proporcjonalne do  $E_1$  i  $E_2$ . Stosunek amplitudy zmiennego napięcia  $V_2$  do stałego  
napięcia  $V_1$  określa eliptyczność promienia. Faza  $2\alpha$  sygnału  $V_2$ , który zmienia się z pod-  
wójną częstotliwością obrotów analizatora  $2\omega t$ , określa zwrot głównej półosi elipsy. Kierunek  
obrotów promienia może być łatwo określony przez umieszczenie dodatkowo ćwierćfa-  
łówki na drodze promienia.

Układ pomiarowy składa się ze źródła światła (lasera HeNe), fotopowielacza i analizu-  
jącego układu elektronicznego. Dla uzyskania najlepszych wyników należy stosować ma-  
teriały o niskiej czułości optycznej, aby względne opóźnienie faz było mniejsze od  $\pi/2$ .  
Dokładność pomiarów opóźnienia jest rzędu tysięcznych radiana, a dokładność ustalenia  
kierunku szybkiej osi jest rzędu 1 stopnia. Pomiar jest punktowy (średnica strumienia  
światła wynosi około 0,25 mm). Prezentowany układ może być stosowany do badań mo-  
deli płaskich, badań metodą warstwy optycznie czynnej, jak i do pomiarów trójwymiaro-  
wych modeli metodą światła rozproszonego.

Na uwagę zasługują wysiłki mające na celu opracowanie połowych metod wyznaczania absolutnych wartości opóźnień. Można wówczas korzystać jedynie z tych możliwości, jakie stwarza optyka. Z wielu prac publikowanych na ten temat wynika, że pozostaje do przezwyciężenia jeszcze wiele trudności. Według oceny przedstawionej przez HOVANESIANA [9] błędy wynikłe z ustalenia pozycji izopach są na ogół małe, natomiast ustalenie przebiegu izochrom jest obciążone dużym błędem, szczególnie gdy izopachy i izochromy są równoległe i gęstość ich występowania w analizowanym obszarze jest zbliżona (rys. 4).



Rys. 4

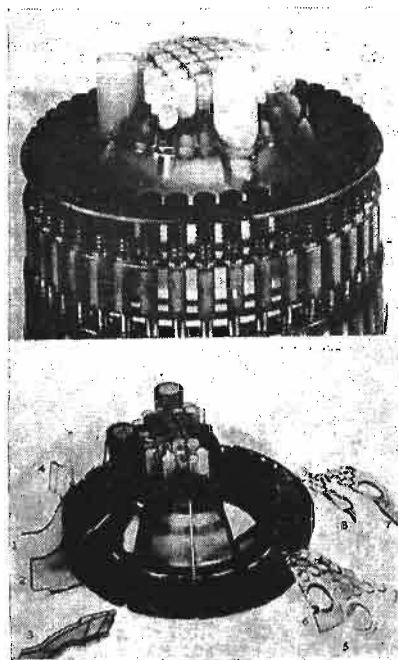
W dziedzinie, którą można objąć wspólnym tytułem — klasyczne, zaawansowane metody doświadczalnej analizy naprężeń, można wyodrębnić następujące kierunki:

- badania dużych skomplikowanych konstrukcji przestrzennych,
- badania dynamiki konstrukcji, dynamiki pęknięć i propagacji fal naprężeń,
- badania materiałów anizotropowych i konstrukcji niejednorodnych,
- badania zagadnień plastyczności,
- badania zagadnień termosprężystości.

W każdym z wymienionych kierunków w ostatnim okresie można zanotować ciekawe osiągnięcia [10]. Omówimy je pokrótce w podanej kolejności.

#### 1. Badanie dużych skomplikowanych konstrukcji przestrzennych

Jest to kierunek o wyraźnie użytkowym charakterze, mający wieloletnie tradycje. Zdobywa on coraz większą popularność dzięki opracowaniu odpowiednich technologii budowy modeli i metod ich analiz. Zapewnienie podobieństwa modelowego wymaga przede wszystkim zachowania podobieństwa kształtu, tolerancji wykonania, braku naprężeń własnych. Aby te warunki były spełnione, gdy podejmuje się wykonanie odlewów modeli o dużych gabarytach służących do analizy takich konstrukcji, jak karтеры silników,



Rys. 5

korpusy turbin, łoża obrabiarek, zbiorniki reaktorów, należy zapewnić spełnienie bardzo ostrych warunków technologicznych. Dokładność pomiarów zależy od dokładności wykonania modeli, na którą wpływają następujące czynniki:

- a) skurcz modelu, współczynniki rozszerzalności cieplnej materiałów modelu i materiału formy;
- b) budowa formy i rdzeni formierskich, ich dokładność wykonania, odkształcalność wszystkich elementów pod ciężarem wlewu;
- c) termiczne własności materiału modelowego i materiału formy;
- d) temperatura odlewania i utwardzania oraz gęstość materiału modelu w temperaturze odlewania;
- e) warunki wygrzewania modelu.

Osiągnięcie zamierzonych efektów w badaniach skomplikowanych modeli jest możliwe dzięki wieloletniej praktyce personelu laboratoriów, ustaleniu ilościowych danych dla określonych gatunków żywic, ścisłemu przestrzeganiu technologii. Rysunek 5 ukazuje model głowicy reaktora, który służył do badań sztywności i do badań naprężeń metodą zamrażania [11].

## 2. Badania dynamiki konstrukcji, dynamiki pęknięć i propagacji fal naprężeń

Kierunek ten przeżywa gwałtowny rozwój, związany z nowymi możliwościami, jakie dają laserowe źródła światła oraz szeroki asortyment materiałów modelowych, w których prędkości rozchodzenia się fal naprężeń są bądź bardzo małe ( $v = 100$  m/sek dla żywic

poliuretanowych), bądź duże (dochodzące do  $v = 5000$  m/sek dla szkła). Ze względu na duże współczynniki tłumienia materiałów modelowych mniej rozwijają się metody analizy drgań; prace te idą raczej w kierunku analizy obciążeń udarowych i propagacji fal naprężeń. W latach pięćdziesiątych wiele prac dotyczyło weryfikacji optyczno-mechanicznych własności materiałów modelowych w warunkach obciążeń udarowych [12]. Stwierdzono, że dla szybko przebiegających procesów ( $de/dt \sim 10^2$  1/sek) czułość materiałów modelowych jest zwykle większa o 10 ÷ 30% od czułości dla obciążeń quasi-statycznych. Ta zmienność własności nie nastęrcza jednak zbytnich trudności z uwagi na występowanie zmian naprężeń w określonych pasmach częstości.

Prowadzone są poszukiwania metod łatwego rozdziału głównych naprężeń. Podczas gdy u nas, w pewnych przypadkach, doskonale wyniki daje metoda charakterystyk, w literaturze naukowej podawane są opisy metod wykorzystujących jednocześnie dane z metody rastrów oraz elastooptyki lub wykorzystujących metodę skośnego prześwietlenia [13]. W pewnych przypadkach zamierzone efekty można uzyskać na drodze analitycznej, proponowanej przez J. W. DALLY [14]. Drugie równanie potrzebne do wyznaczenia głównych naprężeń znajduje on wykorzystując szczególne własności modelu, np. sztywne podparcie lub warunek symetrii (co określa równania odkształceń), lub wykorzystując własności fali normalnej lub poprzecznej w takich obszarach modelu, gdzie występują one osobno.

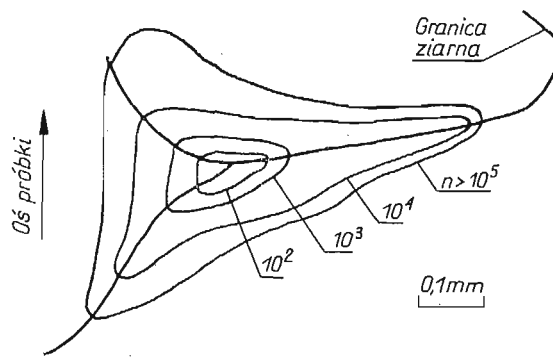
Pewne badania dynamiczne dotyczą zagadnień trójwymiarowych. Ze zrozumiałych względów nie mogą być tu zastosowane metody zamrażania naprężeń; pozostają do dyspozycji metody światła rozproszonego, modeli warstwowych. Najlepsze dotychczas wyniki uzyskano metodą modeli warstwowych z wklejanymi polaroidami [15] dzięki zastosowaniu bardzo cienkich filtrów polaryzacyjnych (0,05 mm), doborowi odpowiednich żywic i klejów. W badaniach sprawdzających obserwowano przechodzenie fal naprężeń przez płaszczyzny sklejeń bez żadnych zakłóceń. Metodą tą uzyskano kilka interesujących wyników. Praktyczne zastosowania dynamicznej elastooptyki są bardzo szerokie. Wystarczy wspomnieć tak ważne przykłady badań geofizycznych, jak ustalenie kierunków propagacji fal naprężeń w wielowarstwowych ośrodkach lub w ośrodkach z pustkami w kształcie wyrobisk górniczych lub w ośrodkach z inkluzjami sztywnymi o kształcie wypełnień. Badano optymalny sposób rozmieszczenia ładunków wybuchowych dla uzyskania właściwego kierunku pęknięcia w niejednorodnych ośrodkach, takich jak złoża mineralne. Badano rozchodzenie się fal wynikające z trzęsień ziemi; zachowanie się budowli w wyniku drgań podłoża. Pewne trudności w tych pracach istnieją w dziedzinie ustaleń warunków podobieństwa modelowego.

Inny przykład zastosowań elastooptyki dynamicznej, to badania nieniszczące. Możliwa jest wizualizacja pęknięć konstrukcji przez załamywanie się na nich fal Rayleigha (powierzchniowych). Obserwowano wyraźną zmianę w odbitej i rozproszonej fali w zależności od stosunku głębokości pęknięcia do długości propagowanej fali. Stwierdzono, że dla głębokości pęknięcia rzędu  $d/\lambda = 1/16 \div 1/8$  odbita fala Rayleigha jest wyraźnie widoczna.

Coraz większe zainteresowanie budzi możliwość zastosowania elastooptyki do badań propagacji pęknięcia. Ogromne możliwości tej metody wykazują ostatnio prace KOBAYASHI [16,18], na temat zatrzymywania propagacji pęknięć, oraz praca SMITHA [17].

### 3. Badania konstrukcji niejednorodnych i materiałów anizotropowych

Kierunek ten ma również w ostatnich latach duże osiągnięcia. Wiążą się one z możliwościami stwarzanymi przez zastosowanie metody warstwy optycznie czynnej, która wielokrotnie była stosowana do badań stanów sprężysto-plastycznych [29, 30, 31]. Ostatnio znalazła ona zastosowanie w badaniach naprężeń na granicach ziarn [19, 20, 21]. Ze względu na porównywalność obszarów koncentracji odkształceń z grubością warstwy optycznie czynnej, istnieją trudności z interpretacją uzyskanych obrazów izochrom. Kieruje to badania na drogę skrajnie cienkich warstw optycznie czynnych (0,01—0,05 mm) i konieczność zwielokrotnienia rzędów izochrom. Dotychczasowe wyniki dotyczące: rozprzestrzeniania się obszarów odkształceń plastycznych wzdłuż granic ziarn, określania współczynników koncentracji odkształceń na dnie karbów o małych promieniach w za-



Rys. 6

leżności od konfiguracji krystalitów, rozprzestrzeniania się stref plastycznych przy obciążeniach cyklicznych, pozwalają sądzić o wielkich możliwościach metody warstwy optycznie czynnej. Stwierdzono, między innymi [21] dla próbek stalowych, pierwsze oznaki koncentracji odkształceń w pobliżu styków trzech ziarn już przy pierwszym cyklu obciążenia. Wartości tych odkształceń dochodziły nawet do kilku procent dla naprężeń poniżej  $300 \text{ MN/m}^2$ . W dalszych cyklach obciążeń (do  $10^4$ — $10^5$  cykli) odkształcenia w strefach wzrastały, a obszar stref odkształceń plastycznych jednocześnie ulegał powiększeniu (rys. 6). W dalszym etapie (po  $10^5$  cykli) następowała stabilizacja i do  $10^6$  cykli nie obserwowano powstawania pęknięć. W pewnych próbach w zakresie  $5 \cdot 10^4$ — $10^5$  cykli, oprócz rozrostu stref odkształceń, obserwowano pojawienie się nowych stref leżących również na granicach ziarn. W pewnych przypadkach strefy deformacji rozprzestrzeniały się do wnętrza ziarn. Dla większych naprężeń (powyżej  $300 \text{ MN/m}^2$  dla stali) zmiany deformacji miały zasadniczo inny charakter. W miarę wzrostu liczby cykli strefy koncentracji odkształceń rozprzestrzeniały się, pokrywając coraz większą część powierzchni próbki; wzrastały też maksymalne odkształcenia.

Do prac tego samego kierunku badań należy analiza struktur makroanizotropowych, takich jak materiały zbrojone. Poza wykorzystywaniem metody warstwy optycznie czynnej



[22] i metody rastrów rozwinęto badania oparte na materiale elastoptycznym o strukturze ortotropowej [23]. Zbudowany jest on z włókna szklanego i odpowiednio dobranych żywic epoksydowych, poliestrowych lub innych, posiadających współczynnik załamania światła równy współczynnikowi dla włókien szklanych ( $n = 1,548 \pm 0,003$ ). Opracowano technologie dla dokładnego zwilżenia włókien, usunięcia wszystkich baniek powietrza i uzyskania równomiernej struktury. Maksymalna zawartość szkła w płytach wynosiła 55%.

SAMPSON [24] sformułował wyrażenia na zależności efektów optycznych od naprężeń w materiałach ortotropowych, wprowadzając trzy stałe materiałowe.

Dla izotropowych materiałów zależność pomiędzy różnicą głównych naprężeń a efektem optycznym jest następująca

$$(5) \quad \sigma_1 - \sigma_2 = nk.$$

Wyrażenie to może być przekształcone do postaci

$$(6) \quad n = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{k} - \frac{\sigma_y}{k}\right)^2 + \left(\frac{2\tau_{xy}}{k}\right)^2}.$$

Wynika z niego, że efekt elastoptyczny składa się z dwóch składników dodawanych wektorowo. Pierwszy składnik jest zależny od naprężeń normalnych o kierunkach  $x$  i  $y$ , drugi składnik jest zależny od naprężeń stycznych. Poza tym dwie wzajemnie prostopadłe składowe naprężeń normalnych wywołują efekty optyczne o przeciwnych znakach.

Mamy więc trzy składniki:  $n_x = \sigma_x/k$ ,  $n_y = \sigma_y/k$ ,  $n_{xy} = \tau_{xy}/k$ , których w badaniach materiałów izotropowych nie trzeba wyodrębniać. W materiałach ortotropowych mają one istotne znaczenie. Ortotropowy materiał musi mieć bowiem wyodrębnione trzy stałe materiałowe:  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_{xy}$ , które mogą być określone w trakcie badań skalujących. Otrzymany efekt elastoptyczny jest równy

$$(6a) \quad n = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{k_x} - \frac{\sigma_y}{k_y}\right)^2 + \left(\frac{2\tau_{xy}}{k_{xy}}\right)^2}.$$

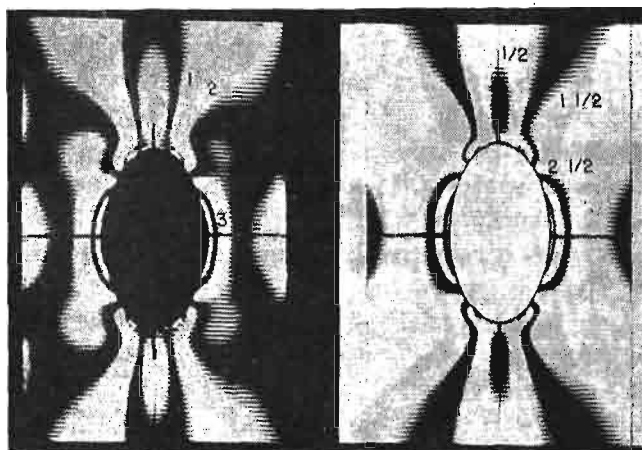
Wyrażenie (6a) może być przedstawione graficznie na kole Mohra dla efektu optycznego. Poszukiwane wartości naprężeń są równe

$$(7) \quad \begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{k_{xy}}{2} n \sin 2\theta', \\ \left(\frac{\sigma_x}{k_x} - \frac{\sigma_y}{k_y}\right) &= n \cos 2\theta', \end{aligned}$$

gdzie kąt  $2\theta'$  jest kątem na kole Mohra.

Rozdział naprężeń  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$  może być dokonany np. metodą różnicy naprężeń stycznych.

DALLY i PRABHAKARAN [23] wyprowadzili zależności pomiędzy efektem optycznym a naprężeniami, uwzględniając różne zawartości żywicy i włókien szklanych, uzyskując bardziej ogólne wyrażenia. Jednakże prostsze wyrażenia SAMPSONA dają prawie równie dobrą dokładność.



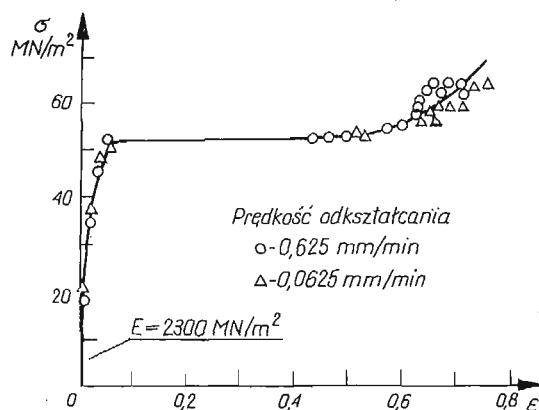
Rys. 7

Dla przykładu podajemy za [25] rozkład izochrom dla ortotropowej tarczy z otworem eliptycznym poddanej równomiernemu rozciąganiu (rys. 7). Jest to wynik badań na zlecenie przemysłu (płyty i powłoki z materiałów zbrojonych z otworami są stosowane w licznych konstrukcjach).

#### 4. Badanie zagadnień plastyczności

Kierunek badań dotyczący analiz plastyczności, w ostatnim okresie również znacznie powiększył swoje możliwości. Pojawiło się wiele publikacji opisujących badania zjawisk plastyczności, w których wykorzystano szczególnie własności poliwęglanów jako materiału modelowego.

Aby można badać na modelach zjawiska plastyczne i interpretować otrzymane wyniki, przyjmuje się, że powinny być spełnione trzy podstawowe kryteria:



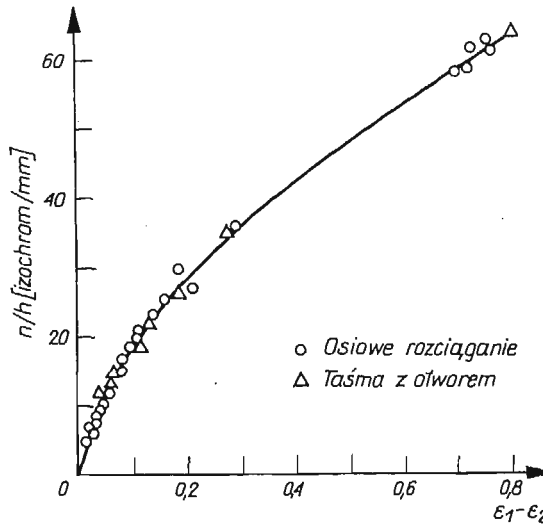
Rys. 8

1. Powinien być podobny przebieg krzywych zależności odkształceń od naprężeń dla modelu i dla konstrukcji.

2. Identyczne musi być kryterium płynięcia.

3. Identyczne powinny być liczby Poissona dla modelu i dla konstrukcji w całym zakresie sprężystym i plastycznym.

W. A. BRILL i G. A. GURTMAN [26, 27] wyznaczyli zależność odkształceń od naprężeń dla poliwęglanu (rys. 8). Jest ona podobna do przyjmowanej w teorii plastyczności charakterystyki sprężysto-plastycznej. Stwierdzili oni również, że wpływ pełzania jest niewielki. Wartość współczynnika Poissona wahała się od  $\nu = 0,32$  dla odkształceń sprężystych do



Rys. 9

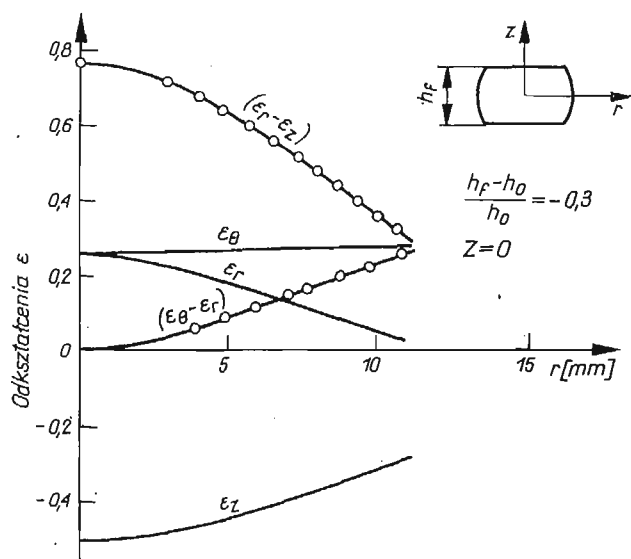
$\nu = 0,42$  dla małych odkształceń plastycznych ( $\epsilon < 0,1$ ). BRILL badał również własności optyczno-mechaniczne. Zależność pomiędzy efektem elastoptycznym a różnicą odkształceń jest wprawdzie nieliniowa, wykazuje jednak monotoniczny wzrost aż do  $\epsilon = 0,8$  (rys. 9).

WHITFIELD i SMITH [28] stwierdzili, że dla konstrukcji z poliwęglanu z dostateczną dokładnością można stosować kryterium HUBERA-MISESA. W pracy BRILLA podane są przykłady badania stref plastycznych i wartości współczynnika koncentracji naprężeń w zależności od stopnia przekroczenia granicy plastyczności.

Poliwęglan okazał się dobrym materiałem dla badań plastyczności elementów trójwymiarowych. Pozostały w modelu po odciążeniu efekt optyczny może być analizowany normalnymi metodami elastoplastyki przestrzennej. Po wycięciu z modelu plasterków, zwykle bardzo cienkich (grubość rzędu ułamka milimetra), można obserwować trwałe odkształcenie w dowolnym przekroju. DALLY i MULC badali trwałe odkształcenia krótkich próbek ściskanych o przekroju kołowym. Trwałe odkształcenie wynosiło około 30%. Dla rozdzielenia głównych odkształceń założono nieściśliwość materiału. Wartości od-

kształceń głównych można było wówczas wyznaczyć na podstawie wyników prześwietlenia plasterków wyciętych w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach. Przykład wyników podaje rys. 10. Tego typu badania wydają się być bardzo przydatne dla różnych dziedzin, np. dla obróbki plastycznej. Pewne zastrzeżenia budzi przyjęcie, na podstawie makroskopowych badań próbek poddanych osiowemu rozciąganiu, założenia o podobieństwie procesów uplastycznienia poliwęglanu i polikrystalicznych materiałów konstrukcyjnych.

Powyższej wady nie posiadają wspomniane już badania procesów uplastycznienia rzeczywistych elementów konstrukcji przy użyciu warstw optycznie czynnych [29, 30, 31, 32]. Jednak są one ograniczone do zagadnień płaskich. Osobną trudność stanowi identy-

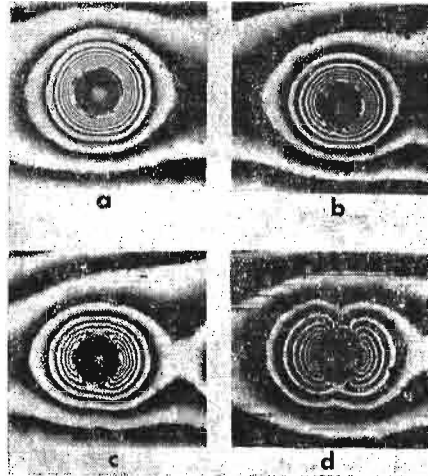


Rys. 10

fikacja uzyskanych obrazów, szczególnie gdy obszary uplastycznienia są porównywalne wymiarami z grubością warstw optycznych. Dla wyznaczenia granic obszarów plastycznych opracowano wiele efektywnych metod postępowania.

W czasie trwania Sympozjum podane zostały przykłady użycia metod warstwy optycznie czynnej dla badania procesu przystosowania się konstrukcji.

Ciekawą metodę badania naprężeń własnych zaproponował UNDERWOOD [33]. Polega ona na obserwacji deformacji, jaka powstaje w wyniku wciśnięcia kulki w gładką powierzchnię konstrukcji. Dzięki zastosowaniu interferometrycznej metody pomiaru odkształceń uzyskał bardzo wyraźny obraz odkształceń plastycznych (rys. 11). Wszelkie odchylenia od osiowo-symetrycznego przebiegu prążków wskazują na istnienie naprężeń. Przez odpowiednie badania skalujące można wyznaczyć ich wartość. Układ jest najbardziej czuły dla jednoosiowego rozciągania, pewne trudności w interpretacji obrazów istnieją dla przypadków dwukierunkowego ściskania. Nieco trudności nastęrcza również różna sztywność podparcia elementu badanego.



Rys. 11

### 5. Badanie zagadnień termosprężystości

Kierunek ten jest dotychczas najslabiej rozwinięty. Wynika to z jednej strony z trudności związanych z pomiarem rozkładów temperatur, szczególnie w złożonych konstrukcjach przestrzennych, z drugiej strony — z trudności w ich modelowaniu na stanowiskach badawczych i pomiaru efektów wywołanych polami cieplnymi. Potrzeby techniki oraz złożoność procesów, szczególnie w przypadku istnienia niejednorodnych konstrukcji, zmusza do prac w tym kierunku. Szczególne potrzeby widoczne są w energetyce, gdzie zmęczenie termiczne powoduje ogromne straty.

Opracowano kilka metod badań naprężeń temperaturowych. Są to:

— metody analogii, w których badania odbywają się na modelach zimnych drogą wymuszenia odpowiednich odkształceń wyznaczonych na podstawie rozkładów temperatury;

— metoda budowy złożonych modeli, których pewne elementy mają uprzednio zamrożone odkształcenia; po sklejeniu modelu odkształcenia te są wyzwolone przez podgrzanie całego modelu do temperatury zamrażania;

— metoda nagrzewania lub ochładzania modeli elastoosprężystych.

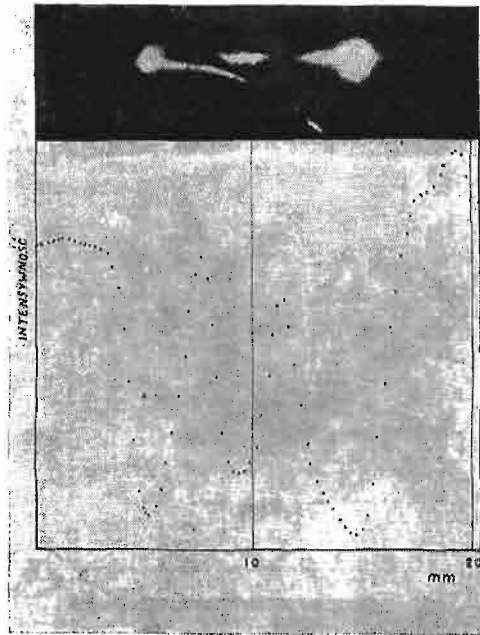
Trzecia, najbardziej bezpośrednia metoda pozwala na badania stanów nieustalonych i jest najbardziej obiecująca. Nastręcza jednak wiele trudności, do których należą:

— wywołanie określonych pól temperatur w modelach,

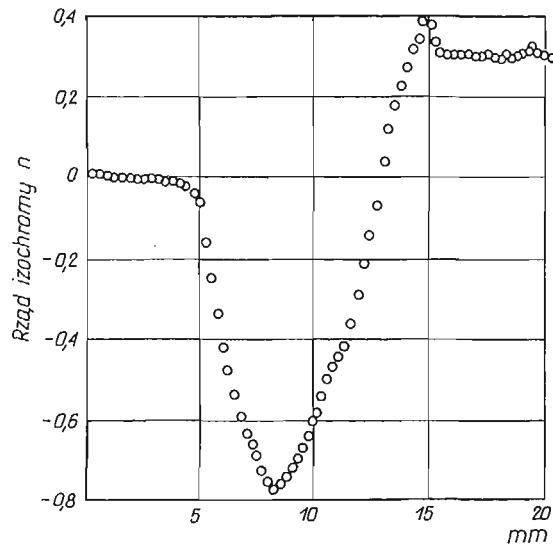
— dokonywanie badań w warunkach temperatur różnych od otoczenia,

— dobór odpowiednich materiałów modelowych i określenie ich własności w całym zakresie stosowanych temperatur. W pewnych przypadkach wymagane jest, by własności te zmieniały się tak, jak własności materiałów konstrukcyjnych w temperaturach pracy analizowanych konstrukcji.

Pomimo tych trudności coraz częściej publikowane są prace podające opis i wyniki takich badań. Dla przykładu omówmy prace J. D. FISHBURN [34]. Zastosował on metodę



Rys. 12



Rys. 13

światła rozproszonego do analizy ustalonych i zmiennych w czasie naprężeń temperaturowych w grubościennych połączeniach rurociągów. Układ obciążający model zapewniał utrzymanie stałego ciśnienia wewnętrznego ( $p = 0,7 \text{ MN/m}^2$ ). Ponadto był realizowany przepływ cieczy immersyjnej o temperaturach  $10^\circ$  i  $100^\circ\text{C}$ . W pierwszym etapie przy użyciu modelu z zatopionymi termoparami zarejestrowano zmianę temperatur w trakcie prze-

plywu cieczy, a następnie na drugim modelu dokonywano pomiarów zmian naprężeń, rejestrując obrazy na taśmie filmowej. W trakcie analizy wyników zrobiono podstawowe założenia, że nie zachodzi obrót płaszczyzny polaryzacji wzdłuż drogi promienia.

Zgodnie z teorią badań naprężeń w świetle rozproszonym intensywność światła rozproszonego  $J$  jest wyrażona zależnością

$$(8) \quad J_s = J_0 A [\sin 2\beta \sin(2\pi n + B) + C],$$

gdzie stałe  $A$  i  $C$  zależą od rozpraszających własności materiału modelu, intensywności odbicia światła przez powierzchnię modelu, absorpcji światła i niejednorodności modelu. Intensywność światła utrwalona na taśmie filmowej zależy dodatkowo od własności materiałów fotograficznych i procesu wywołania. Aby te czynniki wyeliminować trzeba dokonać pomiaru względnego. Dzięki użyciu kompensatorów (ćwierćfalówki i półfalówki) możemy otrzymać trzy różne jasności światła utrwalonego na taśmie:  $J_0$ ,  $J_{\pi/2}$ ,  $J_\pi$ . Autor udowadnia, że rząd izochromy modelu wyraża się zależnością

$$(9) \quad n = \frac{1}{2\pi} \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{\frac{1}{2J_0} - \frac{1}{2J_\pi}}{\frac{1}{J_{\pi/2}} - \frac{1}{2J_0} - \frac{1}{2J_\pi}} \right],$$

a różnica wtórnych, głównych naprężeń wyraża się zależnością

$$(10) \quad \sigma'_1 - \sigma'_2 = k \frac{\partial n}{\partial s} = \frac{k}{2\pi} \frac{\partial}{\partial s} \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{\frac{1}{2J_0} - \frac{1}{2J_\pi}}{\frac{1}{J_{\pi/2}} - \frac{1}{2J_0} - \frac{1}{2J_\pi}} \right].$$

Jeśli wykonać wiele pomiarów  $J_0$ ,  $J_{\pi/2}$ ,  $J_\pi$  wzdłuż przekroju  $S$ , można wyznaczyć wartości rzędu izochromy wzdłuż tego przekroju.

Rysunek 12 podaje przykład utrwalonego obrazu i dokonanych odczytów intensywności światła, rys. 13 — wyznaczone wartości rzędów izochrom. Opisana praca dowodzi jak wiele można otrzymać przez właściwe, skrupulatne opracowanie wyników badań. Trudności napotymane przy posługiwaniu się metodą światła rozproszonego, wynikające z otrzymywania niskich rzędów izochrom i niskiej jakości obrazów, w tym przypadku zostały przełamane. Wykazano, że elastooptyka jest narzędziem do analizy przestrzennych, zmiennych w czasie, stanów naprężeń termicznych.

W podanym przeglądzie aktualnych kierunków rozwoju metod badań stosowanych w mechanice ciała stałego świadomie pominąłem większość prac wykonanych w kraju, gdyż o nich mówili osobiście autorzy w swoich wystąpieniach na Sympozjum. Spośród ogromnej liczby prac publikowanych corocznie wybrałem te, które według mojej opinii stanowią istotny krok naprzód i stanowią ilustrację aktualnych możliwości. Doświadczalne metody badań w mechanice ciała stałego stanowią bowiem ogromną, szybko rozwijającą się dziedzinę. Poza oczywistym, zupełnie podstawowym, znaczeniem dla rozwoju nauki i dla zaspokojenia potrzeb techniki stanowią doskonałą szkołę dla rozwoju kadry, dając jej możliwości osiągnięcia osobistego zadowolenia i satysfakcji z otrzymanych rezultatów.

## Literatura cytowana w tekście

1. H. K. ABEN, *Additional Physical Fields in Photoelasticity*, JUTAM Symposium on the Photoelastic Effect and its Applications, Brussel, September 1973.
2. H. K. ABEN, *Magnetophotoelasticity — Photoelasticity in Magnetic Field*, Experimental Mechanics, **10**, 3 (1970) 97–105.
3. H. K. ABEN, S. IDNURM, *Stress Concentration in Bent Plates by Magnetophotoelasticity*, 5 International Conference on Experimental Stress Analysis, Udine 1974.
4. D. C. DRUCKER, *Photoelastic Analysis of Transverse Bending of Plates in the Standard Transmission Polariscopes*, J. Appl. Mech., **9** (1942) 161–164.
5. Е. И. КЛАВУНОВСКИЙ, Б. В. ЛОПАТИН, Л. Т. ВОРОНЦОВА, Ю. И. ПЕТРОВ, М. И. ШВАРЦМАН, *О структуре оптически активных полимеров на основе эфиров метакриловой и итаконовой кислот, высокомолекулярные соединения*, **6** (10), (1964) 1806–1809.
6. S. RAUTHIER-SAMIER, *The Available Experimental Methods for Measuring Optical Properties of Matter*, JUTAM Symposium on the Photoelastic Effect and its Applications, Brussel 1973.
7. J. EBBENI, *Combination of Moiré and Holographical Methods to Determine the Straine State in a Diffuse Object*, 5 International Conference on Experimental Stress Analysis, Udine 1974.
8. A. ROBERT, *The Application of Poincaré's Sphere to Photoelasticity*, JUTAM Symposium on Photoelastic Effect and its Applications, Brussel 1973.
9. J. D. HOVANESIAN, *Recent Work in Absolute Measurement of Birefringence*, JUTAM Symposium on Photoelastic Effect and its Applications, Brussel 1973.
10. J. W. DALLY, *Classical and Advanced Method in Photoelasticity*, JUTAM Symposium on Photoelastic Effect and its Applications, Brussel 1973.
11. M. M. LEVEN, R. C. SAMPSON, *Photoelastic Stress and Deformation Analysis of Nuclear Reactor Components*, Proc. SESA, **17**, 1 (1959) 161–180.
12. A. B. J. CLARK, R. J. SANFORD, *A Comparison of Static and Dynamic Properties of Photoelastic Materials*, Proc. SESA, **20**, 1 (1963) 148–151.
13. P. D. FLYNN, M. M. FROCHT, *On the Photoelastic Separation of Principal Stresses Under Dynamic Conditions in Oblique Incidence*, J. Appl. Mech., **28**, 1 (1961) 144–145.
14. J. W. DALLY, *Data Analysis in Dynamic Photoelasticity*, Experimental Mechanics, 7–8 (1967).
15. J. W. DALLY, W. F. RILEY, *Initial Studies in Three-Dimensional Dynamic Photoelasticity*, J. Appl. Mech., **34**–2 (1967) 405–410.
16. A. S. КОБАЯШИ, *Experimental Techniques in Fracture Mechanics*, Iowa State University Press SESA-Monograph, 1973.
17. W. SMITH, *Use of Three-Dimensional Photoelasticity in Fracture Mechanics*, Experimental Mechanics, **30**, 2 (1973) 539.
18. A. S. КОБАЯШИ, B. G. WADE, D. E. MAIDEN, *Photoelastic Investigation on the Crack-arrest Capability of a Hole*, Experimental Mechanics, **29**, 1 (1972) 32–37.
19. Z. BRZOSKA, R. JĘDRZEJCZYK, *Badania odkształceń na granicach kryształów*, Praca nie publikowana.
20. А. Я. АЛЕКСАНДРОВ, Л. А. КРАСНОВ, В. А. КУШНЕРОВ, *Применение метода фотоупругих покрытий к исследованию деформаций зерен металлов*, Труды НИИЖТа, **62** (1967).
21. А. Я. АЛЕКСАНДРОВ, Л. А. КРАСНОВ, В. А. КУШНЕРОВ, *Исследование накопления деформаций при циклическом нагружении методом фотоупругих покрытий*, Труды НИИЖТа, **96** (1970).
22. J. W. DALLY, J. ALFIREVICH, *Application of Birefringent Coating to Glass-fiber-reinforced Plastics*, Experimental Mechanics, **9** (1969), 97–102.
23. J. W. DALLY, R. PRAVNAKARAN, *Photo-orthotropic-elasticity*, Experimental Mechanics, **28** (1971) 346–356.
24. R. C. SAMPSON, *A Stress Optic Law for Photoelastic Analysis of Orthotropic*, Experimental Mechanics, **27** (1970) 210–215.
25. R. PRAVNAKARAN, J. W. DALLY, *The Application of Photoorthotropic Elasticity*, Journal of Strain Analysis, 7–4 (1972) 253–260.
26. W. A. BRILL, *Basic Studies in Photoplasticity*, Ph. D. Thesis Stanford University, 1965.



27. G. A. GURTMAN, W. C. JENTINS, K. T. TUNG, *Charakterization of a Birefringent for Use in Photoelastoplasticity*, Douglas Report SM. 47796, January 1965.
28. J. K. WHITFIELD, C. W. SMITH, *Charakterization Studies of a Potential Photoelasto-plastic Material*, *Experimental Mechanics*, 12-2 (1972).
29. P. S. THEOCARIS, *Experimental Solution of Elastic-plastic Plane Stress Problems*, *J. Appl. Mech.*, Dec. 1962.
30. J. KARKOWSKI, J. STUPNICKI, *Doświadczalne badanie elementów maszyn projektowanych metodą nośności granicznej*, *Rozpr. Inżynierskie*, 21, 1 (1973) 161-173.
31. J. KARKOWSKI, J. STUPNICKI, *Propagation of Plastic Zones in a Strip Weakened by an Array of Holes*, *Archiwum Mechaniki Stosowanej*, 25, 3 (1973) 569-573.
32. А. Я. АЛЕКСАНДРОВ, М. Х. АХМЕТЗЯНОВ, *Экспериментальное исследование напряжений и деформаций в неупругих элементах*, Докл. на III Всесоюзном съезде по механике в 1968 г. В кн. „Расчет пространственных конструкций”, № 13, Стройиздат, 1970.
33. J. H. UNDERWOOD, *Residual-stress Measurement Using Surface Displacements Around an Indentation*, *Experimental Mechanics*, 30 (1973) 373-380.
34. J. D. FISHBURN, *Analysis of the Thermal Stress in Complex Model Using Scattered Light Photoelasticity*, Fifth International Conference on Experimental Stress Analysis, Udine 1974.