

ELASTOOPTYCZNE BADANIA TRÓJWYMIAROWEGO STANU NAPRĘŻENIA NA MODELACH Z PERFOROWANĄ WARSTWĄ CZUŁĄ OPTYCZNIE

BOGDAN MICHAŁSKI (WARSZAWA)

Praca zawiera opis nowej elastooptycznej metody wyznaczania wartości i kierunków głównych naprężeń w płaszczyźnie symetrii modeli trójwymiarowych na podstawie obrazu samych izochrom. Proponowana metoda stanowi rozwinięcie znanej metody warstwy optycznie czulej i polega na wklejeniu w miejscu rozpatrywanego przekroju modelu, wykonanego z materiału nieczułego optycznie, warstwy z małymi cylindrycznymi pustkami, wykonanej z materiału o podobnych cechach mechanicznych lecz dużej czułości optycznej. Kierunki i wartości naprężeń głównych w rozpatrywanych punktach wyznacza się na podstawie lokalnych zakłóceń przebiegu izochrom w otoczeniu pustek pomiarowych. Praca zawiera opis techniki pomiarowej i interpretacji wyników badań.

1. UWAGI WSTĘPNE

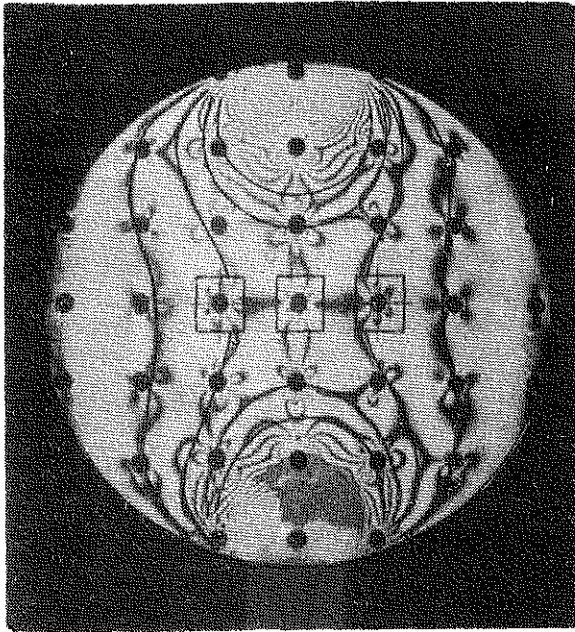
Metody elastooptyczne stanowią bardzo wygodne i skuteczne narzędzie wyznaczania naprężeń brzegowych tak w zagadnieniach płaskich jak i w trójwymiarowych. W przeciwieństwie do tego wyznaczanie wartości rozdzielonych naprężeń w punktach wewnętrznych badanych modeli przy użyciu metod elastooptycznych jest znacznie bardziej kłopotliwe. Największe trudności napotyka się przy wyznaczaniu rozdzielonych naprężeń w punktach wewnętrznych trójwymiarowych modeli elastooptycznych, gdyż nie można skorzystać wówczas z większości obliczeniowych i doświadczalnych metod rozdzielania naprężeń, stosowanych przy analizie płaskiego stanu naprężenia.

Najeczęściej stosowaną w praktyce metodą rozdzielania naprężeń w elastooptyce trójwymiarowej jest metoda różnicy naprężeń stycznycych; jest ona jednak mało dokładna i bardzo uciążliwa w praktycznym zastosowaniu [1]. Metoda ta opiera się bowiem na analizie wykresów izoklin, stanowiących jak wiadomo najslabsze i obarczone największym błędem ogniwo pomiarów elastooptycznych i wymaga sumowania niewielkich przyrostów naprężeń stycznycych, od nieobciążonego brzegu poczynając w głąb modelu. Praktyczne wykorzystanie tej metody jest dość kłopotliwe ze względu na konieczność analizy wyjściowych obrazów izochrom i izoklin w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach modelu.

Powyższe względy skłoniły autora do podjęcia prac nad elastooptyczną metodą modelową badania elementów trójwymiarowych, umożliwiającą wyznaczanie na drodze czysto doświadczalnej zarówno naprężeń brzegowych jak i wartości oraz kierunków głównych naprężeń w rozpatrywanych wewnętrznych punktach płaszczyzny symetrii modelu trójwymiarowego.

Zaproponowana metoda, zwana w dalszym ciągu metodą warstwy perforowanej, stanowi rozwinięcie znanej od dawna i dość powszechnie stosowanej elastooptycznej metody warstwy optycznie czułej; różni się ona od tej ostatniej odmienną techniką wykonania modeli i inną interpretacją wyników badań.

Metoda warstwy perforowanej polega na wykonaniu modelu elastooptycznego z materiału nieczułego optycznie i wklejeniu w miejscu rozpatrywanego przekroju płytki z materiału o zbliżonym module sprężystości i o wysokiej czułości optycznej z wywierconymi cylindrycznymi otworkami, przedłużonymi na określoną długość w głąb materiału nieczułego optycznie. Tak wykonany model prześwietla się następnie w wannie immersyjnej i bada w podobny sposób, jak modele trójwymiarowe ze zwykłą warstwą czułą optycznie. Naprężenia w modelu wyznacza się wyłącznie na podstawie analizy obrazu izochrom. Istotną cechą metody warstwy perforowanej jest bowiem to, że wszystkie informacje odnośnie stanu naprężenia uzyskuje się wyłącznie na podstawie analizy obrazów izochrom i nie korzysta się z izoklin. Izokliny dostarczają dodatkowych informacji o kierunkach głównych i mogą być ewentualnie wykorzystane do kontroli poprawności wyników.



Rys. 1

Analizując obraz izochrom w modelu z warstwą perforowaną można wyodrębnić dwa rodzaje izochrom: izochromy przechodzące przez cały model, mające taki sam przebieg jak izochromy w analogicznym modelu z jednolitą warstwą czułą bez perforacji oraz nakładające się na nie izochromy, występujące w bezpośrednim sąsiedztwie pustek walcowych, wywołane przez lokalne zakłócenia stanu naprężenia w otoczeniu tych pustek. Izochromy pierwszego rodzaju nazywane będą

w dalszym ciągu «makroizochromami», izochromy zaś drugiego rodzaju — «mikroizochromami».

Typowy obraz izochrom w modelu kuli ściskanej siłami skupionymi wzdłuż średnicy z warstwą perforowaną wklejoną w płaszczyźnie symetrii przedstawia rys. 1, na którym zaznaczono ciągłymi liniami przebieg makroizochrom i obwiedziono strefę mikroizochrom.

Przy wyznaczaniu naprężeń korzysta się z obu rodzajów izochrom. Analiza przebiegu makroizochrom umożliwia wyznaczenie naprężeń brzegowych oraz różnic naprężeń głównych wewnątrz modelu, natomiast analiza przebiegu mikroizochrom dostarcza informacji odnośnie do kierunków i wartości głównych naprężeń w punktach wewnętrznych modelu. Sposoby interpretacji wyników badań modeli z warstwą perforowaną omówione zostaną szczegółowo w p. 3.

2. SPOSÓB WYKONANIA MODELI I PARAMETRY BADANIA

Z przyjętej koncepcji badania wynikają określone wymagania dotyczące wykonania modeli i parametrów badania.

2.1. Przedłużenie pustek w głąb materiału nieczulego

Jak już wspomniano, zamierzeniem autora było wykorzystanie obrazu mikroizochrom do wyznaczania zarówno kierunków jak i wartości naprężeń głównych w wewnętrznych punktach pomiarowych w płaszczyźnie symetrii modelu. Stąd też konieczne jest uzyskanie czytelnych obrazów mikroizochrom, które mogłyby być porównywane z pewnymi obrazami wzorcowymi, stanowiącymi podstawę do wyznaczenia współczynników obliczeniowych. Aby zamierzenie to mogło być spełnione, należy zapewnić w rozpatrywanej warstwie czulej quasi-płaski stan odkształcenia na całej jej powierzchni, w tym także w bezpośrednim otoczeniu pustek. To zaś można osiągnąć jedynie przez przedłużenie pustek na określoną długość w głąb materiału nieczulego optycznie.

2.2. Odstępy pustek

Wybór właściwych odstępów pustek pomiarowych (stosunek rozstawu pustek do ich średnicy) jest zawsze wynikiem pewnego kompromisu. Z jednej strony bowiem należy dążyć do możliwie gęstego rozmieszczenia pustek pomiarowych, aby otrzymać możliwie dużo punktów pomiarowych wewnątrz modelu, natomiast z drugiej strony pamiętać należy o tym, że zbyt gęsta siatka pustek sprawia, iż makroizochromy stają się słabo widoczne. Ponadto przedstawiona metoda badania opiera się na założeniu, że model jest jednorodny pod względem własności mechanicznych, podczas gdy wprowadzenie zbyt gęsto rozmieszczonych pustek powoduje zmianę własności sprężystych warstwy optycznie czulej.

Celem ustalenia optymalnego odstępów zbadano modele mające trzy różne podziałki pustek $D/d=3, 5$ i $7,5$. Stosunek $D/d=3$ okazał się zbyt mały i nie udało się otrzymać przy nim wyraźnych makroizochrom. Za najwłaściwszą podziałkę uznano $D/d=5$ i taki właśnie rozstaw pustek przyjęto we wszystkich badanych modelach.

Przy podziałce $D/d=7,5$ otrzymano co prawda bardzo wyraźne makroizochromy, lecz liczba punktów pomiarowych była wówczas niewystarczająca do wyznaczania rozkładu naprężeń w rozpatrywanych przekrojach modeli. Jednocześnie z analizą wyrazistości makroizochrom porównano także wykresy makroizochrom w modelu półprzestrzeni z warstwą perforowaną znajdującą się pod działaniem obciążenia pierścieniowego — z wykresem izochrom w analogicznym modelu półprzestrzeni z jednolitą warstwą czułą optycznie. Stwierdzono, że przy podziałce otworów $D/d=5$ izochromy w obu modelach pokrywały się niemal dokładnie ze sobą.

2.3. Średnica pustek

Przy doborze średnicy pustek, podobnie jak i przy ustalaniu ich podziałki, stoi się wobec dwóch sprzecznych wymagań. Z jednej strony pożądane jest użycie pustek o jak najmniejszej średnicy, gdyż mniejszy jest wówczas wpływ nierównomierności naprężeń w analizowanym otoczeniu pustki. Z drugiej strony, im mniejsza jest średnica pustek, tym gorszy jest obraz mikroizochrom.

W modelach zbadanych przez autora zastosowano pustki o średnicy 3 mm. Jak wykazały doświadczenia, przy tej średnicy pustek uzyskuje się jeszcze zupełnie wyraźny obraz mikroizochrom nadający się do analizy.

Średnica pustek pomiarowych mogłaby jednak zostać zmniejszona. Zmniejszenie średnicy pustek wydaje się korzystne z tego względu, że zapewnia ono uzyskanie lepszej symetrii obrazu mikroizochrom, zwłaszcza w strefach o dużym gradientcie naprężeń.

2.4. Obciążenie modelu

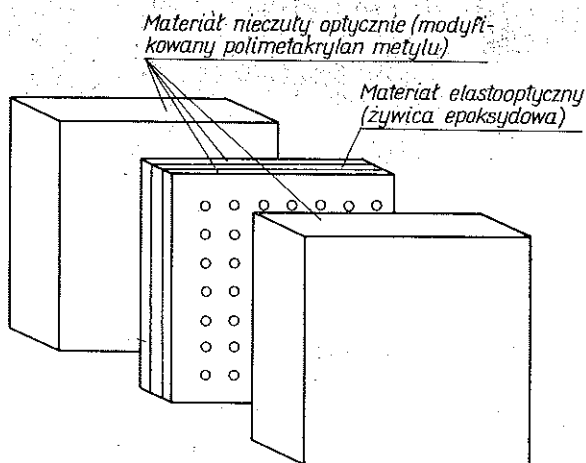
Praktyka wykazała, że badania modelu z warstwą perforowaną najlepiej jest prowadzić przy dwóch różnych obciążeniach. Obciążenie, przy którym występują najbardziej wyraźne obrazy makroizochrom, powoduje bowiem pogorszenie wyrazistości obrazów mikroizochrom. Trzeba bowiem pamiętać o tym, że maksymalne rzędy mikroizochrom na brzegu pustki pomiarowej są w przybliżeniu dwukrotnie wyższe, aniżeli rząd makroizochromy w odpowiadającym punkcie modelu. Za obciążenie optymalne z punktu widzenia analizy obrazów mikroizochrom należałoby uznać obciążenie, przy którym maksymalny rząd mikroizochrom na brzegu pustki wynosi 3 do 5. Optymalna wartość obciążenia zależy zresztą także w pewnym stopniu od przyjętego sposobu interpretacji wyników.

2.5. Dobór materiałów modelowych

Istotne znaczenie ma wybór odpowiednich materiałów modelowych. Wobec braku w sprzedaży stosownych materiałów o wymaganej minimalnej dwójłomności autor zmuszony był przeprowadzić szereg badań materiałowych (prób technologicznych), zmierzających do ustalenia właściwego składu materiału nieczulego optycznie. Badania te zostały uwieńczone sukcesem. Udało się otrzymać materiał o stałej materiałowej rzędu 5000 kG/cm^2 rz.iz., nie gorszy od materiałów używanych w zagranicznych laboratoriach do wykonania modeli z warstwą czułą optycznie.

3. TECHNIKA WYKONANIA MODELI

Wypróbowano kilka różnych sposobów wykonania modeli. Ostatecznie przyjęto sposób przedstawiony na rys. 2, polegający na wklejeniu najpierw płytki czulej optycznie pomiędzy dwie cienkie płyty z materiału nieczulego optycznie, a następnie po związaniu kleju, wywierceniu w tak wykonanym układzie płytek przelotowych walcowych otworków i wklejeniu perforowanych płytek pomiędzy dwa masywne bloki z materiału nieczulego optycznie. Wykonany w ten sposób blok, służący jako materiał do wykonania modeli, jest pokazany na rys. 3a, na którym uwidoczniło również dla porównania blok z wklejoną jednolitą warstwą optycznie czułą. Z tak sklejonego bloku wykonuje się następnie modele do badań korzystając z zwykłych metod obróbki mechanicznej (rys. 3b).



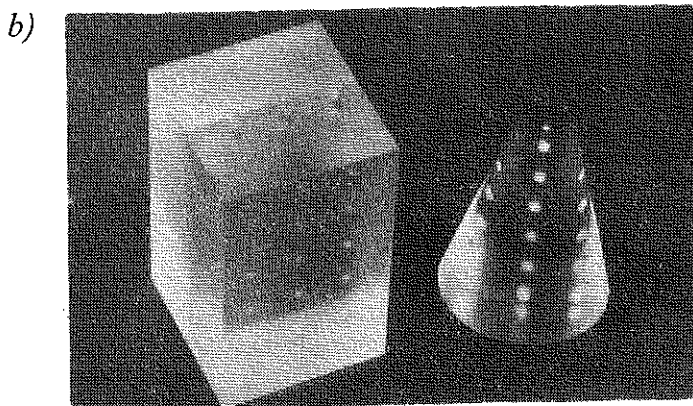
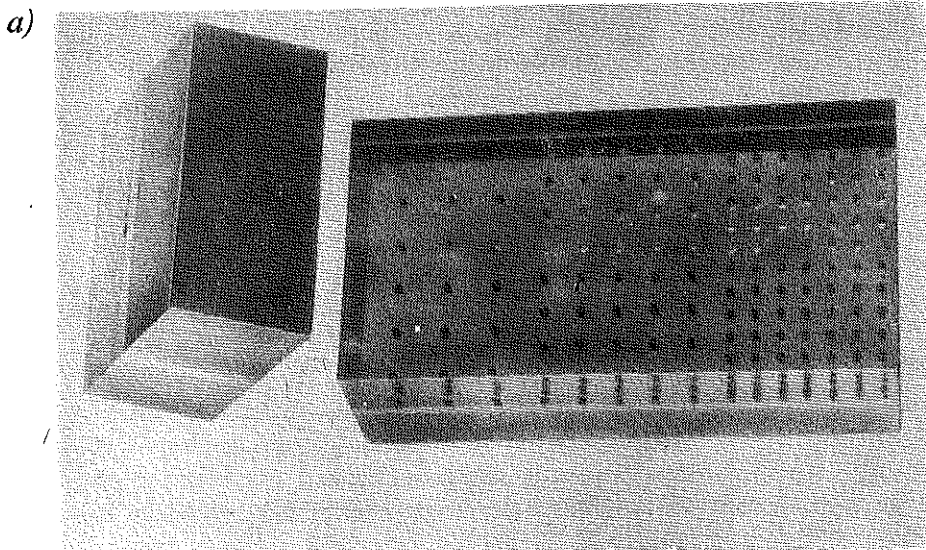
Rys. 2

Technika klejenia modeli z warstwą perforowaną jest taka sama jak technika klejenia modeli ze zwykłą warstwą optycznie czułą [2]. Zwrócimy tutaj uwagę jedynie na pewne osobliwości techniki klejenia tych modeli, które nie występują przy wykonywaniu modeli ze zwykłą warstwą optycznie czułą.

Przy pierwszych próbach klejenia obawiano się, że rzadki klej będzie zalewał pustki walcowe i w związku z tym zabezpieczano je przed przedostaniem się kleju wypełniając je watą, ligniną, plasteliną i innymi materiałami. Jak wykazały późniejsze doświadczenia te środki zabezpieczające nie są jednak konieczne. Okazało się, że wycieki kleju do niezabezpieczonych pustek są minimalne i nie mają żadnego wpływu na ostateczny kształt pustek pod warunkiem, że stosuje się odpowiednio cienką warstwę kleju.

Drugą trudnością, występującą w fazie obróbki mechanicznej, były kłopoty z zachowaniem odpowiedniego położenia osi pustek w stosunku do konturów modelu. Jak się okazało nie jest to bynajmniej tak proste, jak mogłoby się wydawać na pierwszy rzut oka. Jedynym dobrym rozwiązaniem jest oparcie się przy trasowaniu na dwóch

płaszczyznach odniesienia bloku, mających znane położenie w stosunku do osi pustek. Trasowanie metodami optycznymi jest kłopotliwe i nie zapewnia pożądanej dokładności, zwłaszcza w przypadku modeli o krzywoliniowych powierzchniach.



Rys. 3

Na zakończenie warto zwrócić uwagę na jeszcze jedną istotną i interesującą cechę modeli z perforowaną warstwą optycznie czułą. W modelach tych na brzegach wewnętrznych zamkniętych pustek pomiarowych nie występuje niemal zupełnie brzegowy efekt czasu. Po dwóch latach przechowywania modele były tak samo użyteczne, jak i bezpośrednio po wykonaniu. Jeśli weźmiemy ponadto pod uwagę, że efekt brzegowy na brzegach modelu jest również niewielki, nietrudno zrozumieć, jak bardzo ułatwione jest w tym przypadku prowadzenie badań.

4. INTERPRETACJA WYNIKÓW

4.1. Zasady ogólne

Jak wspomniano, w proponowanej metodzie perforowanej warstwy czułej optycznie wszystkie wartości naprężeń w modelu wyznacza się wyłącznie na podstawie analizy obrazów izochrom, którą rozbić można na dwa etapy: analizę makroizochrom i mikroizochrom.

Analiza makroizochrom dostarcza informacji o rozkładzie naprężeń brzegowych i różnicach naprężeń głównych wewnątrz modelu. Na podstawie analizy mikroizochrom wyznaczyć można kierunki i wartości głównych naprężeń w wewnętrznych punktach pomiarowych modelu (w miejscach pustek walcowych).

Sposób wyznaczenia naprężeń brzegowych i różnic naprężeń głównych jest podobny, jak w przypadku modeli ze zwykłą jednolitą warstwą czułą optycznie z tym tylko zastrzeżeniem, że przy badaniu modeli z warstwą perforowaną nie można stosować kompensacyjnych metod pomiaru rzędu makroizochromy, lecz należy oprzeć się na wyśrodkowanym powierzchniowym wykresie makroizochrom.

Przy sporządzaniu wykresu naprężeń brzegowych należy pamiętać o tym, że pustki znajdujące się blisko brzegu powodować mogą pewne zakłócenia naprężeń brzegowych i konieczne jest w związku z tym wygładzenie wykresu tych naprężeń. Nie jest to na ogół trudne ze względu na lokalny charakter występujących zakłóceń.

4.2. Wyznaczanie kierunków naprężeń głównych

Kierunki główne w wewnętrznych punktach pomiarowych modelu odpowiadają kierunkom osi symetrii obrazu mikroizochrom. W ogromnej większości przypadków ustalenie osi symetrii obrazu mikroizochrom nie nastęrcza kłopotów i może być dokonane z dość dużą precyzją.

Pewne trudności mogą wynikać jedynie wówczas, gdy oba naprężenia główne różnią się tylko nieznacznie od siebie. Najlepiej oprzeć się wówczas na położeniu punktów izotropowych znajdujących się w pobliżu perforacji.

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na pewną przewagę sposobu wyznaczania kierunków głównych, stosowanego w metodzie warstwy perforowanej (to jest na podstawie obrazu mikroizochrom) nad tradycyjnym wyznaczaniem tych kierunków w badaniach elastooptycznych na podstawie parametrów izoklin. W metodzie warstwy perforowanej już wstępne oględziny obrazu mikroizochrom (porównanie otrzymanego obrazu mikroizochrom z obrazami wzorcowymi dla różnych stosunków σ_2/σ_1) pozwalają stwierdzić, który kierunek odpowiada naprężeniu σ_{\max} , a który σ_{\min} . Analiza wykresu izoklin nie daje, jak wiadomo, tej możliwości.

4.3. Wyznaczenie wartości naprężeń głównych w wewnętrznych punktach pomiarowych modelu (w miejscach pustek walcowych)

Najprostszym i zarazem najbardziej uniwersalnym sposobem wyznaczania głównych naprężeń w miejscach pustek pomiarowych jest sposób polegający na pomiarze wartości efektów optycznych w dwóch ustalonych punktach w pobliżu pustki walcowej.

Jako punkty pomiarowe obrano punkty leżące na brzegu pustek pomiarowych na osiach symetrii obrazu elastoptycznego (punkty A i B , rys. 4). Wartości naprężeń w tych punktach podlegają zasadzie superpozycji i wyrażają się następującymi prostymi wzorami:

$$\sigma_A = a\sigma_1 + b\sigma_2, \quad \sigma_B = b\sigma_1 + a\sigma_2,$$

gdzie a i b są to współczynniki wyrażające stosunek naprężenia odpowiednio w punktach A i B do naprężenia w punkcie oddalonym od otworu przy jednoosiowym obciążeniu σ_1 lub σ_2 .

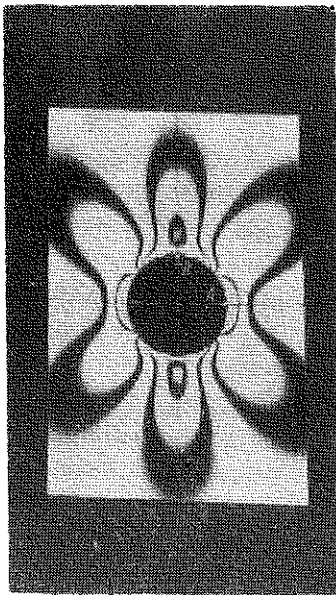
Wyrażając naprężenia w rzędach izochrom i oznaczając efekty optyczne w punktach A i B przez n_A i n_B , a następnie rozwiązując te równania względem σ_1 i σ_2 , otrzymujemy odpowiednio

$$\sigma_1' = \frac{1}{a^2 - b^2} (an_A - bn_B), \quad \sigma_2' = \frac{1}{a^2 - b^2} (an_B - bn_A),$$

gdzie σ_1' i σ_2' są to naprężenia główne wyrażone w rzędach izochrom.

Tak więc znając efekty optyczne w punktach A i B obliczyć można w prosty sposób za pomocą powyższych wzorów oba naprężenia główne. Naprężenia dogodnie jest wyznaczać w rzędach izochrom. Współczynniki a i b wyznaczono eksperymentalnie na podstawie badania modelu skalującego. Był nim model walcowy z obciążeniem równomiernym, przyłożonym do czołowych powierzchni. Wyznaczone eksperymentalnie wartości współczynników wynosiły $a=1,85$, $b=0,36$.

Podobieństwo warunków pracy warstwy czulej optycznie w modelu zastosowanym przez autora do warunków pracy tarczy z otworem kołowym nasuwa myśl, aby przy obliczaniu współczynników a i b oprzeć się na teoretycznym rozwiązaniu dla tarczy nieskończonej z otworem kołowym [3 i 4]. Współczynniki a i b wynosiłyby wówczas $a=3$ oraz $b=-1$. Bardziej szczegółowe badania wykazały jednak, że rozkład naprężeń w bezpośrednim sąsiedztwie pustek w modelu zastosowanym przez autora różnił się dość znacznie od rozkładu naprężeń

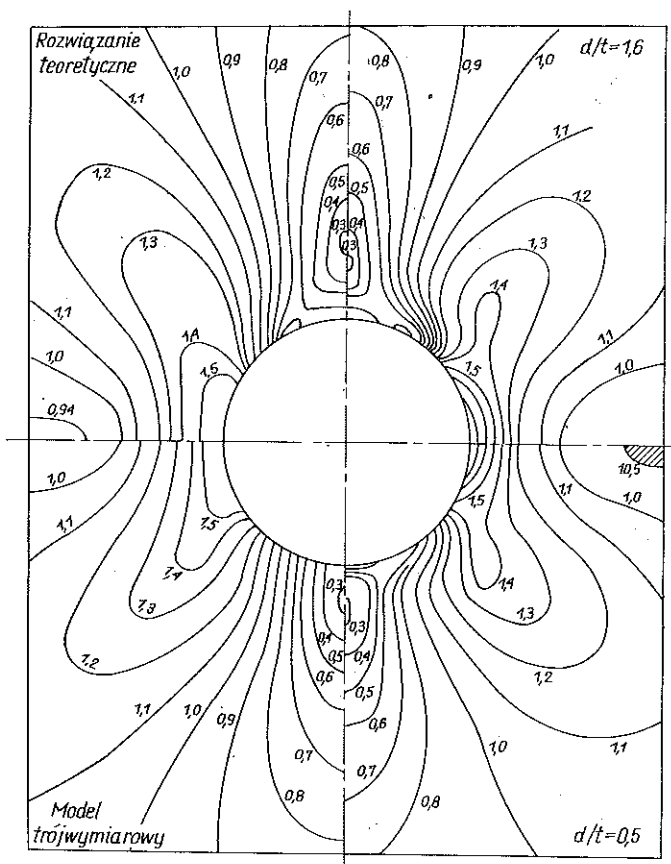


Rys. 4

żeń w tarczy nieskończonej z kołowym otworem (rys. 5). Różnice pomiędzy teoretycznym rozwiązaniem Kirscha a rozkładem naprężeń wokół pustek w modelu cechującym były największe na brzegach pustek i szybko malały w miarę oddalania od pustek.

Dążąc do ustalenia przyczyn tej rozbieżności przeanalizowano wpływ wzajemnego oddziaływania pustek (otworów) na rozkład naprężeń na brzegach pustek; autor

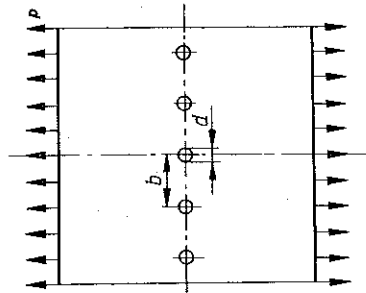
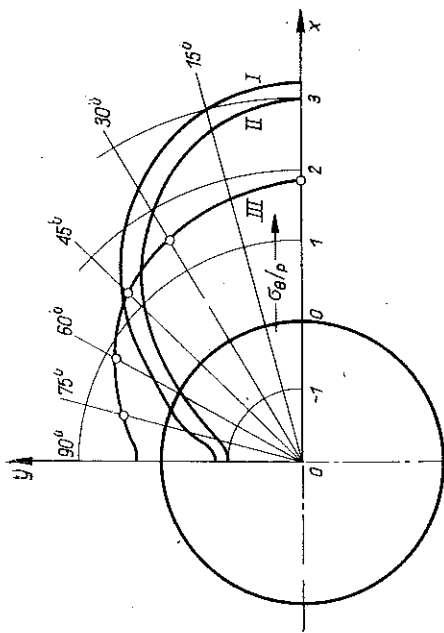
przeprowadził analizę, w jakim stopniu rozkład naprężeń na brzegu otworu w przypadku tarczy z szeregiem otworów położonych na osi działania obciążenia i prostopadle do tej osi różni się od rozkładu naprężeń tarczy z pojedynczym otworem. Na rys. 6 i 7 przedstawiono wykresy naprężeń brzegowych dla tarcz mających szereg otworów o różnej podziałce, zaczerpnięte z pracy [4], i porównano je z wykresem naprężeń brzegowych dla perforowanego modelu cechującego i tarczy z pojedynczym otworem. Jak widać z przytoczonych wykresów, rozkład naprężeń w tarczy mającej szereg otworów jest bardziej zbliżony do rozkładu naprężeń w trójwymiarowym modelu cechującym, aniżeli rozkład naprężeń w tarczy z pojedynczym otworem.



Rys. 5

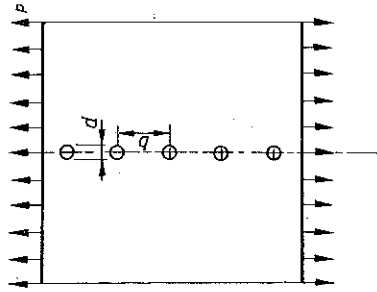
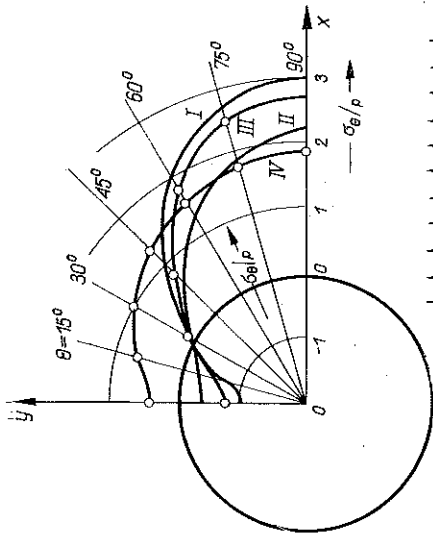
Niewątpliwie pewien wpływ na zarejestrowany obraz izochrom ma również zastosowana technika laboratoryjna badania. Im mniejszy jest stosunek średnicy pustki do grubości warstwy czulej, tym mniej wyraźny staje się bowiem obraz izochrom przy brzegu otworu i tym bardziej dają o sobie znać takie czynniki, jak na przykład nieprostokątność krawędzi otworu.

Na rys. 8 i 9 przedstawiono nomogramy do wyznaczania wartości obu głównych naprężeń σ_1 i σ_2 na podstawie zmierzonych wartości efektów optycznych w punktach



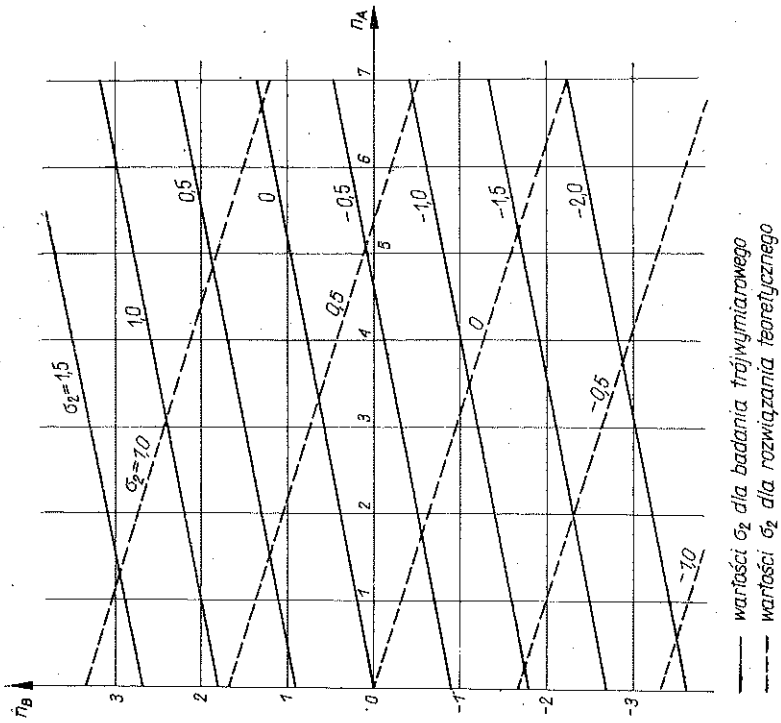
Rys. 6

I — rozwiązanie teoretyczne dla tarczy nieskończonej z pojedynczym otworem,
 II — rozwiązanie teoretyczne dla tarczy nieskończonej z kilkoma otworami $d/b = 0,20, 0,50, 0,80$, III — model trójwymiarowy $d/b = 0,20$

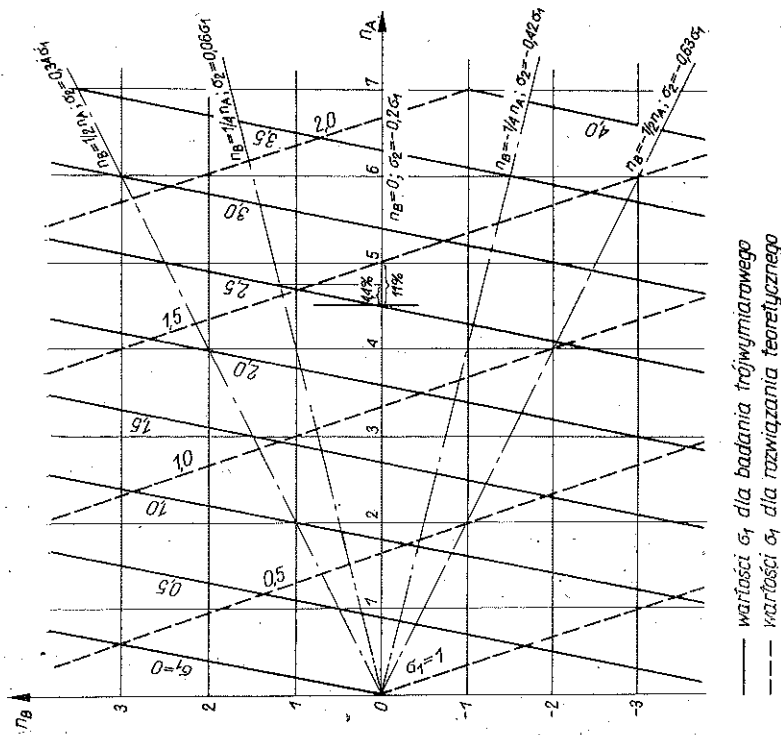


Rys. 7

I — rozwiązanie teoretyczne dla tarczy nieskończonej z pojedynczym otworem, II — rozwiązanie teoretyczne dla tarczy nieskończonej z kilkoma otworami $d/b = 0,20, 0,50, 0,80$, III — rozwiązanie teoretyczne dla tarczy nieskończonej z kilkoma otworami $d/b = 0,20, 0,50, 0,80$, IV — model trójwymiarowy $d/b = 0,20$

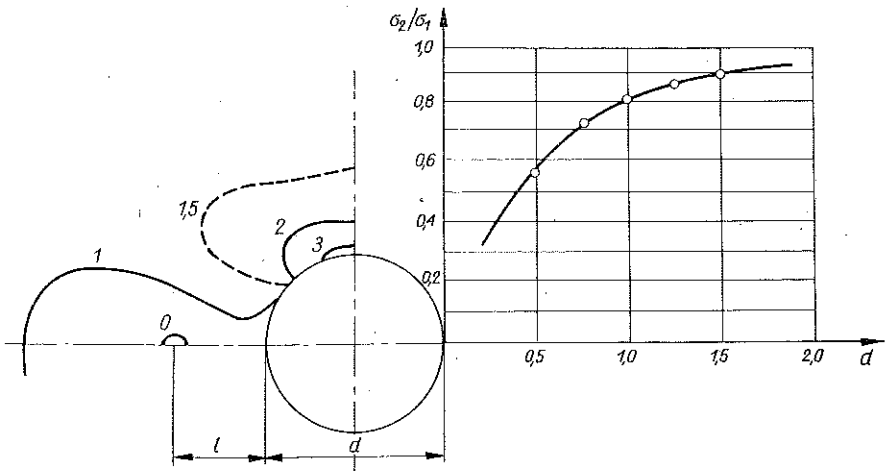


Rys. 9



Rys. 8

pomiarowych A i B . Ciągłymi liniami przedstawiono wykresy $\sigma_1 = \text{const}$ i $\sigma_2 = \text{const}$ odpowiadające rozwiązaniu teoretycznemu Kirscha, a przerywanymi liniami — wartości tych naprężeń, odpowiadające współczynnikom wyznaczonym na podstawie modelu cechującego. Jak widać z nomogramu zamieszczonego na rys. 8 większe naprężenie główne σ_1 zależy w decydującej mierze od zmierzonego efektu optycznego w punkcie A . Efekt optyczny w punkcie B ma nieznaczny wpływ na σ_1 zwłaszcza w przypadku niewielkiego stosunku σ_2/σ_1 . Stąd też w pewnych przypadkach można zastosować uproszczony sposób wyznaczania większego naprężenia głównego σ_1 wyrażonego jak poprzednio w rzędach izochromy, polegający na pomiarze efektu optycznego jedynie w punkcie A i określeniu σ_1 ze wzoru $\sigma_1' = Cn_A$, gdzie n_A oznacza zmierzony efekt optyczny w punkcie A , a C jest to stały współczynnik wynoszący 0,56. Jak widać z nomogramu dokładność tego uproszczonego sposobu wyznaczania σ_1 jest tym większa, im bardziej stosunek σ_2/σ_1 zbliża się do liczby $-0,2$. Sposób ten może być jednak stosowany przy dość szerokim zakresie stosunków σ_2/σ_1 . Błąd wynikający z zaniedbania wpływu n_B nie przekracza 4,4%, jeśli σ_2/σ_1 mieści się w granicach od $-0,42$ do $0,06$ i 11%, jeśli σ_2/σ_1 mieści się w granicach od $-0,63$ do $0,34$.



Rys. 10

Główne naprężenia w miejscu pustek pomiarowych można również wyznaczyć ustalając najpierw stosunek σ_2/σ_1 przez pomiar położenia pewnych wybranych charakterystycznych punktów obrazu mikroizochrom, a następnie dokonując pomiaru wartości efektu optycznego w jednym z wybranych punktów pomiarowych i określając na tej podstawie σ_1 oraz σ_2 .

Jako charakterystyczny punkt mikroizochrom, którego położenie umożliwia określenie stosunku σ_2/σ_1 , można wybrać tutaj punkt izotropowy leżący na osi σ_1 . Punkt ten pojawia się przy stosunku $\sigma_2/\sigma_1 > 0,2$ i w miarę zwiększania się tego stosunku oddala się od otworu. Położenie jego jest jednoznacznie uzależnione od

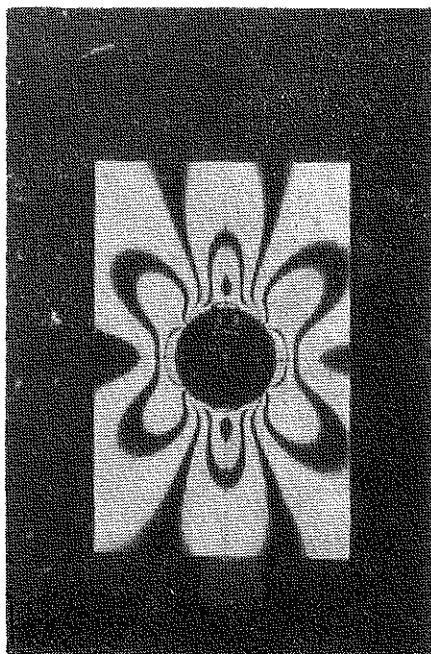
stosunku σ_2/σ_1 . Odległość punktu izotropowego od otworu dla tarczy z otworem według rozwiązania Kirscha daje się wyrazić następującym wzorem:

$$\frac{x}{r} = \sqrt{\frac{\sigma - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 3 + \sqrt{22\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2 + 24\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 36}}}$$

Na rys. 10 przedstawiono wykresy odległości punktu izotropowego od otworu na podstawie badania cechującego. Wyznaczenie naprężeń tym sposobem polega na wyznaczeniu odległości punktu izotropowego od brzegu otworu, ustaleniu na tej podstawie stosunku σ_2/σ_1 , przeprowadzeniu pomiaru efektu elastoptycznego w punkcie A i wyznaczeniu naprężeń głównych ze wzorów

$$\sigma_1 = n_A \frac{1}{a + b \frac{\sigma_2}{\sigma_1}},$$

$$\sigma_2 = n_A \frac{1}{a \frac{\sigma_1}{\sigma_2} + b}$$

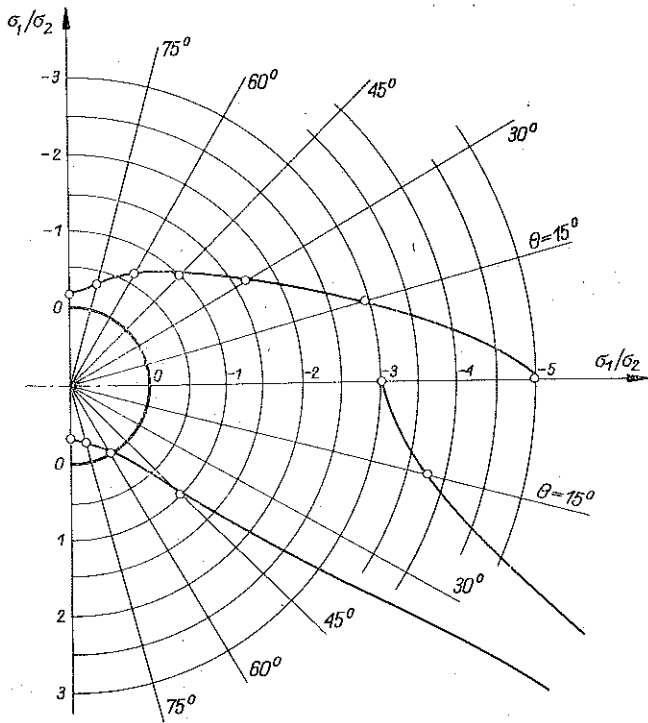


Rys. 11

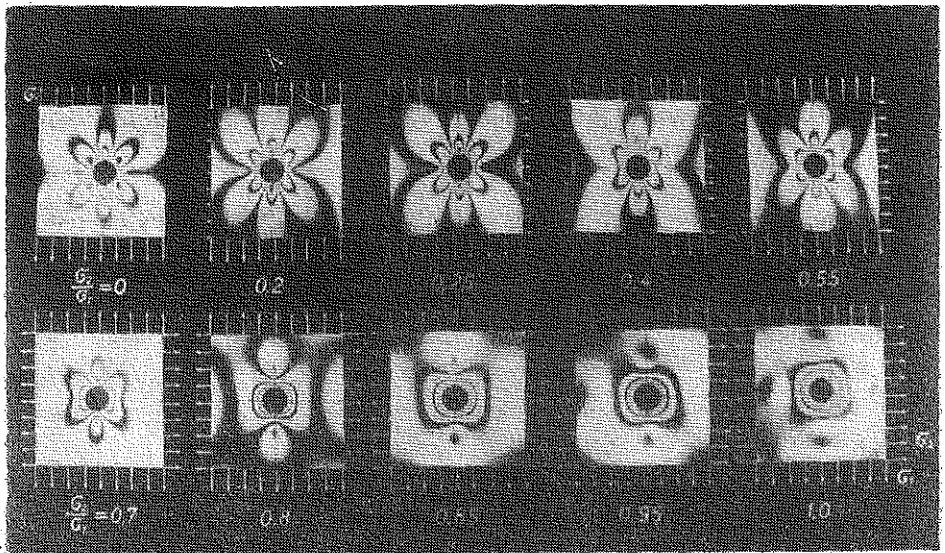
Sposób wyznaczania stosunku σ_2/σ_1 na podstawie położenia punktu izotropowego, analogiczny do wyżej przedstawionego, był zaproponowany w odniesieniu do czujników szklanych w pracach [6 i 7]. Jako punkty charakterystyczne, umożliwiające wyznaczenie stosunku σ_2/σ_1 , można też wybrać punkty zmiany znaku naprężenia brzegowego na brzegu otworu (rys. 11). Położenie tych punktów jest jednoznacznie uzależnione od stosunku σ_2/σ_1 . W przypadku tarczy z otworem kołowym wyraża się ono wzorem

$$\theta = \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{2} \frac{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 1}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1}$$

Na rys. 12 przedstawiono wykresy przedstawiające położenie punktu zmiany znaku naprężeń (punktu zerowego) na brzegu otworu, otrzymane na podstawie rozwiązania Kirscha (dolna część rysunku) i w wyniku badania modelu cechującego

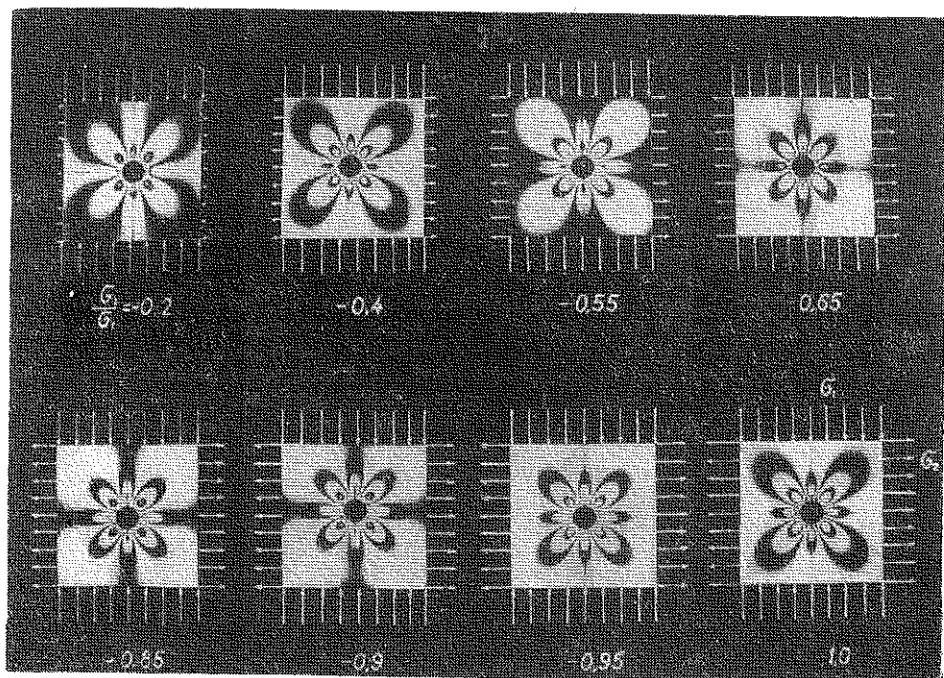


Rys. 12



Rys. 13

(górną część rysunku). Jak widać, oba te wykresy wykazują jakościowe różnice, stąd też przy pomiarach nie można było posługiwać się w tym przypadku wykresem teoretycznym, lecz należało oprzeć się na wykresie wyznaczonym eksperymentalnie. Technika wyznaczania naprężeń jest w tym przypadku identyczna ze sposobem poprzednio opisanym.



Rys. 14

Można wreszcie określić stosunek σ_2/σ_1 porównując otrzymany obraz mikroizochrom w otoczeniu rozpatrywanej pustki z wzorcowymi obrazami izochrom w pobliżu otworu, otrzymanymi przy różnych stosunkach σ_2/σ_1 . Celowi temu służą zdjęcia wzorcowych izochrom w otoczeniu otworu, odpowiadające różnym stosunkom σ_2/σ_1 (rys. 13 i 14).

5. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA METODY WARSTWY PERFOROWANEJ

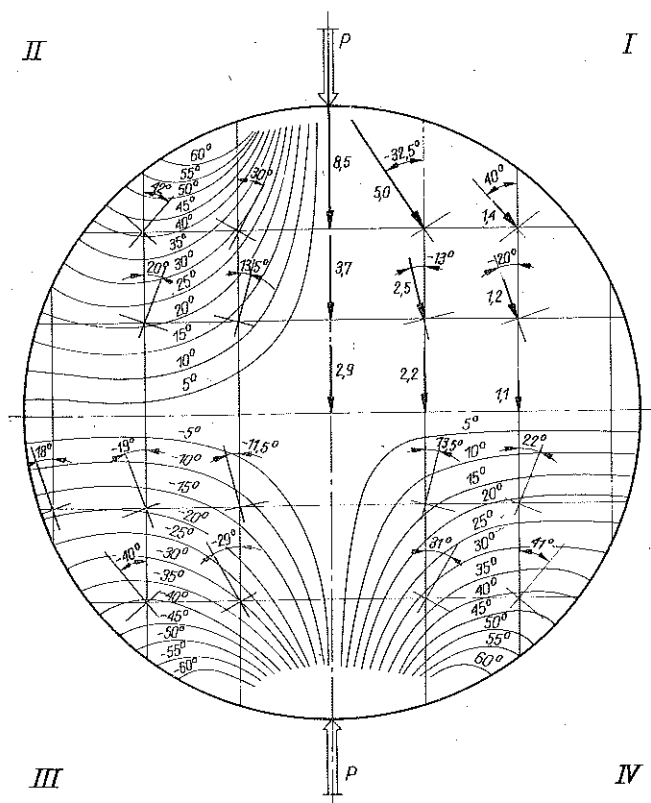
Dla sprawdzenia dokładności i technicznej przydatności przedstawionej metody przeprowadzono kilka kontrolnych badań elementów trójwymiarowych i porównano wartości wyznaczone metodą warstwy perforowanej z wartościami uzyskanymi innymi sposobami oraz z naprężeniami dla tych samych ciał, wyznaczonymi przez innych autorów na drodze obliczeniowej lub eksperymentalnej. Poniżej przedstawiono wyniki badania kuli ściskanej siłami skupionymi wzdłuż średnicy.

Badania kuli przeprowadzono trzema metodami: warstwy perforowanej, «zamrażania» naprężeń i zwykłej warstwy optycznie czulej. Wyniki otrzymane tymi

metodami porównano z sobą oraz z wynikami otrzymanymi na drodze eksperymentalnej przez FILIMONOWĄ [7], jak również z naprężeniami, wyznaczonymi na podstawie teoretycznego rozwiązania STERNBERGA i ROSENTHALA [8].

Model z perforowaną warstwą optycznie czułą wykonano ze specjalnego polime-takrylanu metylu modyfikowanego ftalanem dwubutyłu o stałej materiałowej około 5000 kG/cm rząd iz.

Jako warstwy czulej użyto francuskiej żywicy epoksydowej o następującej charakterystyce: $K_1 = 13,9$ kG/cm. rząd iz. i $E = 29800$ kG/cm². Średnica modelu kuli wynosiła 65 mm, średnica pustek — 3 mm, a ich odstęp — 15 mm. Model umiesz-czony był podczas badania w wannie immersyjnej wypełnionej ftalanem dwubutyłu, mającym podobny współczynnik załamania światła do współczynnika materiału modelu.

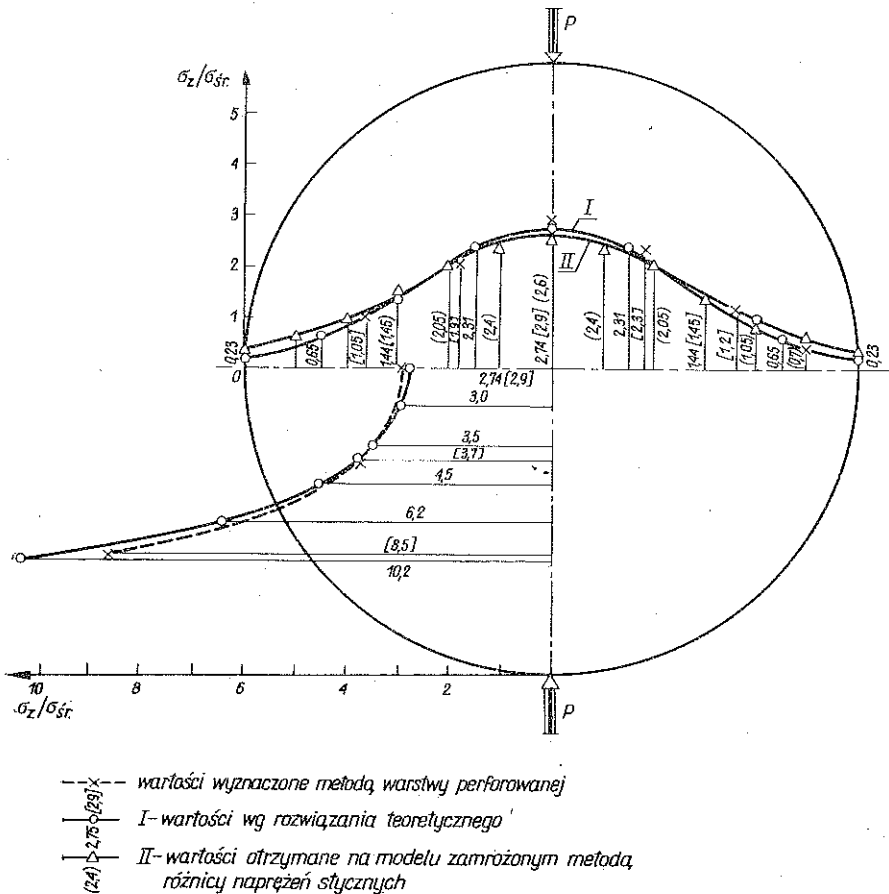


Rys. 15

Na podstawie otrzymanych zdjęć izochrom wyznaczono kierunki i naprężenia główne (rys. 15, sektor I). Na podstawie otrzymanych naprężeń głównych sporządzono wykresy naprężeń pionowych w obu głównych przekrojach symetrii kuli (rys. 16, linia przerywana).

Przeprowadzono też badanie kuli metodą «zamrażania» naprężeń na modelu o średnicy 100 mm, wykonanym z żywicy epoksydowej typu Epidian o następują-

ych własnościach w temperaturze zamrażania $K_1=0,28 \text{ kG/cm}$ rząd iz., $E=140 \text{ kG/cm}^2$. Zamrażanie wykonywano w kąpeli glicerynowej, gdyż zapewnia ona płynny spadek temperatury i chroni w pewnym stopniu model przed efektem brzegowym czasu. Po zamrożeniu model wyskalowano na skalarce i pocięto na płytki na specjalnie do tego celu zaadaptowanej frezarce.



Rys. 16

Na podstawie wykonanych zdjęć izochrom i izoklin wyznaczono kierunki główne w punktach pomiarowych, odpowiadających położeniu pustek w modelu z warstwą perforowaną (rys. 15, sektor II) i obliczono naprężenia w poziomym przekroju symetrii (rys. 16). Posłużono się do tego celu metodą różnic naprężeń stycznich, wykorzystując uproszczenia występujące w przypadku ciał mających płaszczyzną symetrii.

Jako trzeci zbadano model kuli ze zwykłą warstwą czułą optycznie. Technika tego badania była podobna do techniki badania modelu kuli z warstwą perforowaną.

Ograniczono się do zbadania modelu z warstwą optycznie czułą usytuowaną w południkowej płaszczyźnie symetrii i wyznaczenia kierunków głównych w wybranych punktach pomiarowych tej płaszczyzny (rys. 15, sektor III).

Na rys. 15 (sektor IV) uwidoczniiono kierunki główne w wybranych punktach pomiarowych wyznaczone przez FILIMONOWĄ [7]. Na rys. 16 uwidoczniiono liniami ciągłymi wykresy naprężeń, wyznaczone na podstawie rozwiązania teoretycznego STERNBERGA i ROSENTHALA (wartości tych naprężeń zaczerpnięto z pracy [10]).

Jak widać na rys. 15 średnie różnice kątowe między kierunkami głównymi, wyznaczonymi różnymi metodami, wynoszą 2° (maksymalna różnica nie przekracza $3,5^\circ$). Z wykresów zamieszczonych na tym rysunku widać ponadto, że różnice między wartościami otrzymanymi metodą warstwy perforowanej a wartościami wyznaczonymi pozostałymi metodami są tego samego rzędu, co różnice pomiędzy wartościami wyznaczonymi metodą «zamrażania» naprężeń i metodą zwykłej warstwy optycznie czulej. Świadczy to o tym, że dokładność wyznaczania kierunków głównych na modelach z warstwą perforowaną jest nie mniejsza niż dokładność wyników uzyskiwanych metodą zwykłej warstwy czulej lub metodą «zamrażania» naprężeń.

Analiza wykresów naprężenia pionowego σ_z na osi symetrii kuli (rys. 16) wykazuje, że różnice pomiędzy naprężeniami wyznaczonymi metodą warstwy perforowanej a otrzymanymi na podstawie rozwiązania teoretycznego i na podstawie badania modelu «zamrożonego» nie przekraczają $1/4$ rzędu izochromy, przy czym większe rozbieżności stwierdza się pomiędzy rozwiązaniem teoretycznym a wartościami uzyskanymi na modelu «zamrożonym», niż pomiędzy rozwiązaniem teoretycznym a wartościami wyznaczonymi na modelu z warstwą perforowaną. «Spłaszczenie» wykresu σ_z w modelu zamrożonym wytłumaczyć można większymi odkształceniami tego modelu.

6. UWAGI KOŃCOWE

Zamiarem autora było stworzenie możliwie prostej i łatwej do praktycznej realizacji metody badania trójwymiarowego stanu naprężenia. Jak się wydaje, przedstawiona metoda spełnia ten postulat. Wymaga ona zasadniczo pokonania tych samych trudności, co dobrze znana, dość powszechnie stosowana metoda zwykłej warstwy czulej optycznie. Oznacza to, że można ją stosować bez dodatkowych nakładów na próby technologiczne i opanowanie techniki laboratoryjnej we wszystkich tych laboratoriach, które stosują metodę warstwy optycznie czulej. Podkreślić przy tym należy, że przez zastąpienie zwykłej warstwy czulej warstwą perforowaną nie traci się zalet metody warstwy czulej i że otrzymane obrazy mogą być analizowane zwykłymi metodami, stosowanymi przy konwencjonalnej metodzie warstwy czulej. Wprowadzenie perforacji pozwala natomiast na uzyskanie pewnych dodatkowych brakujących informacji odnośnie do stanu naprężenia, dzięki czemu ułatwia ono analizę i stwarza możliwości dodatkowej kontroli poprawności otrzymanych wyników.

Często podnoszoną zaletą metod elastoptycznych jest ich poglądowy charakter, jak to pięknie wyraził M. M. FROCHT: «W elastoptyce niewidzialne staje się widzialne». Otrzymywane w metodzie elastoptycznej obrazy izochrom pozwalają

już na pierwszy rzut oka ocenić pracę rozpatrywanego modelu lub przekroju i dostrzec miejsca niebezpiecznych spiętrzeń naprężeń.

Osądowni czytelników pozostawiam ocenę, czy zaproponowana w tej pracy metoda nie jest jednak jeszcze bardziej pogładowa od klasycznych metod elastooptyki. Wszak zdjęcie izochrom zawiera tutaj wszystkie informacje tak o wartościach, jak i kierunkach naprężeń. Patrząc na nie widzimy nie tylko miejsca i spiętrzenia naprężeń, lecz dostrzegamy również na pierwszy rzut oka kierunki głównych naprężeń. Przebieg trajektorii staje się widoczny już przy wstępnych oględzinach otrzymanego obrazu elastooptycznego. Co więcej, dysponując odpowiednim zestawem wzorcowych zdjęć izochrom w otoczeniu otworków dla różnych stosunków σ_2/σ_1 można ocenić z dość dobrym przybliżeniem już na pierwszy rzut oka wielkości i kierunki rozdzielonych naprężeń w punktach pomiarowych. Klasyczne metody elastooptyki nie dają tej możliwości. Brak jest w nich wyraźnie dostrzegalnego związku pomiędzy izoklinami a trajektoriami naprężeń. Nawet dysponując pełnym zestawem izoklin trudno najczęściej wyobrazić sobie przebieg trajektorii i dopiero długotrwała i wnikliwa analiza pozwala wykryć ich przebieg i charakter pracy rozpatrywanego elementu. Jakakolwiek ocena wartości rozdzielonych naprężeń na podstawie samych tylko oględzin obrazów elastooptycznych jest w ogóle niemożliwa i wielkość naprężeń określić można tylko drogą pracochłonnych i najczęściej niezbyt dokładnych obliczeń.

Na zakończenie warto pokusić się o odpowiedź na pytanie, jaka jest praktyczna przydatność proponowanej metody i czy istnieją możliwości rozszerzenia jej zakresu i na inne zagadnienia. Mogło by się pozornie wydawać, że podstawowa domena przedstawionej metody, jaką jest badanie stanu naprężenia w płaszczyźnie symetrii modeli trójwymiarowych, obejmuje dość wąski krąg zagadnień. Tak jednak nie jest. Zagadnienia symetryczne stanowią przecież dość obszerną klasę zagadnień trójwymiarowej sprężystości i znaczna część interesujących z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia przypadków trójwymiarowych są to właśnie przypadki symetryczne. Ponadto musimy pamiętać o tym, że metoda warstwy perforowanej, podobnie jak i metoda zwykłej warstwy czułej optycznie, otwiera przed badaczem szersze możliwości, aniżeli na przykład klasyczna dziś metoda «zamrażania» naprężeń: może ona być używana do badania zarówno zwykłych zagadnień statycznych jak i problemów termosprężystości. Bezsorna jest jej przydatność do badania zagadnień kształtowania wytrzymałościowego (ten sam model może być badany wielokrotnie po zmianie kształtu), można wykorzystać ją do badania naprężeń kontaktowych, a nawet nic nie stoi na przeszkodzie, aby wykorzystywać ją do badania zjawisk dynamicznych.

Czy jednak nie istnieje możliwość rozszerzenia zakresu zastosowania przedstawionej metody i na inne zagadnienia? Kuszącą wydaje się myśl, aby wykorzystać proponowaną metodę perforowanej warstwy czułej optycznie do badania stanu naprężenia na płaskich powierzchniach modeli trójwymiarowych (np. w grubych płytach), gdzie zastosowanie zwykłej warstwy czułej optycznie właściwie nie rozwiązuje zagadnienia; albo warstwa wklejona jest styczna do powierzchni płyty i wtedy nie pozwala ona na ustalenie wartości naprężeń głównych, lecz tylko ich różnic, albo

też położona jest prostopadle do brzegu i wówczas pozwala na wyznaczenie naprężeń tylko wzdłuż jednej linii na powierzchni modelu.

Przedstawione w niniejszej pracy sposoby rozdzielania naprężeń mają charakter uniwersalny i mogą być wykorzystywane również przez innych autorów, którzy pragnęliby zastosować metodę perforowanej warstwy czulej optycznie w swoich badaniach. Należy jednak pamiętać o tym, że wielkości współczynników obliczeniowych, wykorzystywanych do rozdzielania naprężeń, wyznaczone na podstawie badania cechującego — zależą oczywiście od parametrów konkretnego modelu i mogą być inne w przypadku użycia modeli o innych parametrach. Stąd też badacze, którzy pragnęliby korzystać ze sposobów rozdzielania naprężeń opisanych w niniejszej pracy, powinni przeprowadzić oddzielne badania cechujące dla każdego zestawu modeli wykonanych z tych samych materiałów i przy zastosowaniu tej samej technologii, aby wyznaczyć tą drogą liczbowe wartości współczynników obliczeniowych.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. F. THAMM, *Problemy techniki przestrzennych badań elastooptycznych*, Księga Zjazdowa Konferencji Doświadczalnej Analizy Naprężeń, Jabłonna 1972.
2. R. S. DOROSZKIEWICZ, J. LIETZ, B. MICHALSKI, *Metoda warstwy elastooptycznej w zastosowaniu do modelowego badania przestrzennych zagadnień kontaktowych*, Rozprawy Inżynierskie, 15, 3, 457-468, 1967.
3. G. KIRSCH, *Theorie der Elastizität and die Bedürfnisse der Festigkeitslehre*, VDI, XLII, 29, 799, 1898.
4. G. N. SAWIN, *Spannungserhöhung am Rande von Löchern*, VDE Verlag, Berlin, 1956.
5. R. C. HOWLAND, *Spannungen in einer Platte mit einer unendlichen von Löchern*, Proc. Soc. London, Ser. A, CXLVII, 471-491, 1935.
6. A. ROBERTS, L. HAWKES, F. T. WILLIAMS, K. R. DHIR, *A laboratory study of the photoelastic stressmeters*, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., Pergamon Press, No. 1, 441-458, 1964.
7. R. S. DOROSZKIEWICZ, *Elastooptyka — stan i rozwój polaryzacyjno-optycznej metody doświadczalnej analizy naprężeń*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1974.
8. E. N. FILIMONOWA, *Opređenje naprjaženii w osesimetricznoj zadaczi na ob'emnykh modelach iz opticeski nieczuwstwitelnogo materiala s opticeski czuwstwitelnymi wklejkami*, Trudy VII Wsiesojuznoj Konferenciji po Polarizacjonno Opticeskomu Metodu Issledowanija Naprjaženii, Tallin 1971.
9. E. STERNBERG, F. ROSENTHAL, *The elastic sphere under concentrated load*, J. Appl. Mech., 4, 10, 413, 1952.
10. P. HABIB, D. RADENKOWIC, J. SALENÇON, *Repture des roches ecrasees entre les palteaux d'une presse*, Dechema-Monographien, 57.

Резюме

ФОТОУПРУГИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА МОДЕЛЯХ С ПЕРФОРИРОВАННЫМ ОПТИЧЕСКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ СЛОЕМ

Работа содержит описание нового фотоупругого метода определения значений и направлений главных напряжений в плоскости симметрии трехмерных моделей на основе изображения самых изохром. Предложенный метод составляет развитие известного метода

оптически чувствительного слоя и заключается во вклеивании в место рассматриваемого сечения модели, изготовленной из оптически нечувствительного материала, слоя с малыми цилиндрическими пустотами, изготовленного из материала с аналогичными механическими свойствами, но с большой оптической чувствительностью. Направления и значения главных напряжений в рассматриваемых точках определяются на основе локальных возмущений картинки полос в окрестности измерительных пустот. Работа содержит описание измерительной техники и интерпретации результатов исследований.

SUMMARY

PHOTOELASTIC INVESTIGATIONS OF A THREE-DIMENSIONAL STATE OF STRESS ON MODELS WITH A PERFORATED OPTICALLY SENSITIVE LAYER

The paper contains the description of a new photoelastic method of determination of the values and directions of principal stresses in the plane of symmetry of three dimensional models on the base of the fringe pattern only. The method suggested by the author represents an extension of the known method of optically sensitive layer and consists in cementing in the considered section of the model made of optically non-sensitive material an optically sensitive layer with small cylindrical voids, made of material with similar mechanical properties but with high optical sensitivity. The directions and values of the principal stresses at the points under consideration are determined on the base of the local disturbances of the fringe pattern in the vicinity of the measuring voids. The paper includes a description of the laboratory techniques and interpretation of the results of investigations.

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

Praca została złożona w Redakcji dnia 8 kwietnia 1974 r.
