



**Katedra Wytrzymałości Materiałów
i Metod Komputerowych Mechaniki**

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska

**LABORATORIUM
WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW**

**Analiza stanu naprężenia
metodą elastooptyczną**

KWIM/MKIM

1. CEL ĆWICZENIA

- ♦ Zapoznanie się z budową polaryskopu elastoptycznego.
- ♦ Zapoznanie się z elastoptycznymi metodami badań modelowych na przykładzie modelu płaskownika poddanego rozciąganiu.
- ♦ Określenie elastoptycznej stałej modelowej.
- ♦ Określenie naprężeń krańcowych w przekroju przez osłabione otworem.
- ♦ Określenie współczynnika kształtu

2. WPROWADZENIE DO ĆWICZENIA

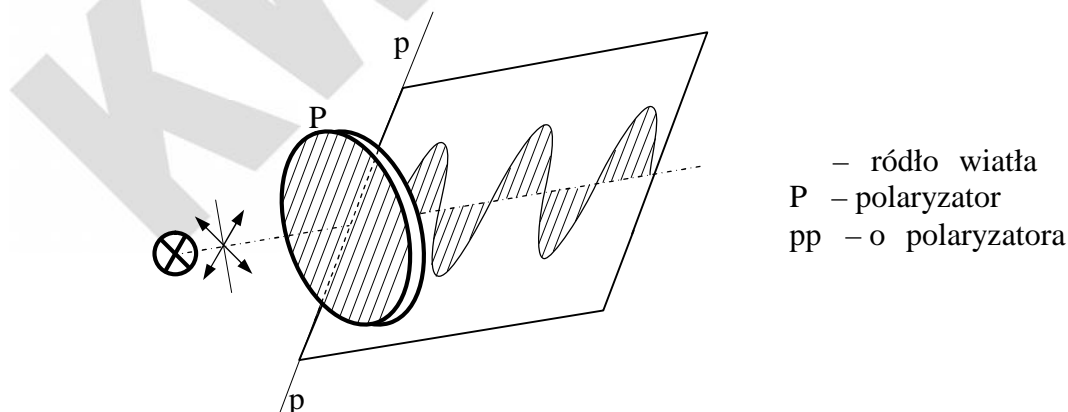
Do jednej z doświadczalnych metod analizy stanu naprężenia należy metoda elastoptyczna. Metoda ta oparta jest na pewnych zjawiskach optycznych zachodzących w niektórych ciałach przezroczystych, takich jak: szkło, żywice poliestrowe, itp., które wykazują dwójłomność wymuszoną.

Z ciała wykazującego tę własność wykonuje się model badanego elementu, poddaje obciążeniu, a następnie na podstawie odpowiednich praw wnioskuje się o stanie naprężenia w rzeczywistym elemencie konstrukcji. Przez wietlając przezroczysty i obciążony model wiązki światła spolaryzowanego na ekranie polaryskopu otrzymuje się obraz modelu pokryty układem jasnych i ciemnych pręg. Znajomość rozkładu tych pręg pozwala na określenie stanu naprężenia powstałego w modelu. Przy określaniu pola naprężeń metodami optycznymi traktuje się światło jako falę poprzeczną o określonej długości i określonej częstotliwości.

3. PODSTAWY TEORETYCZNE

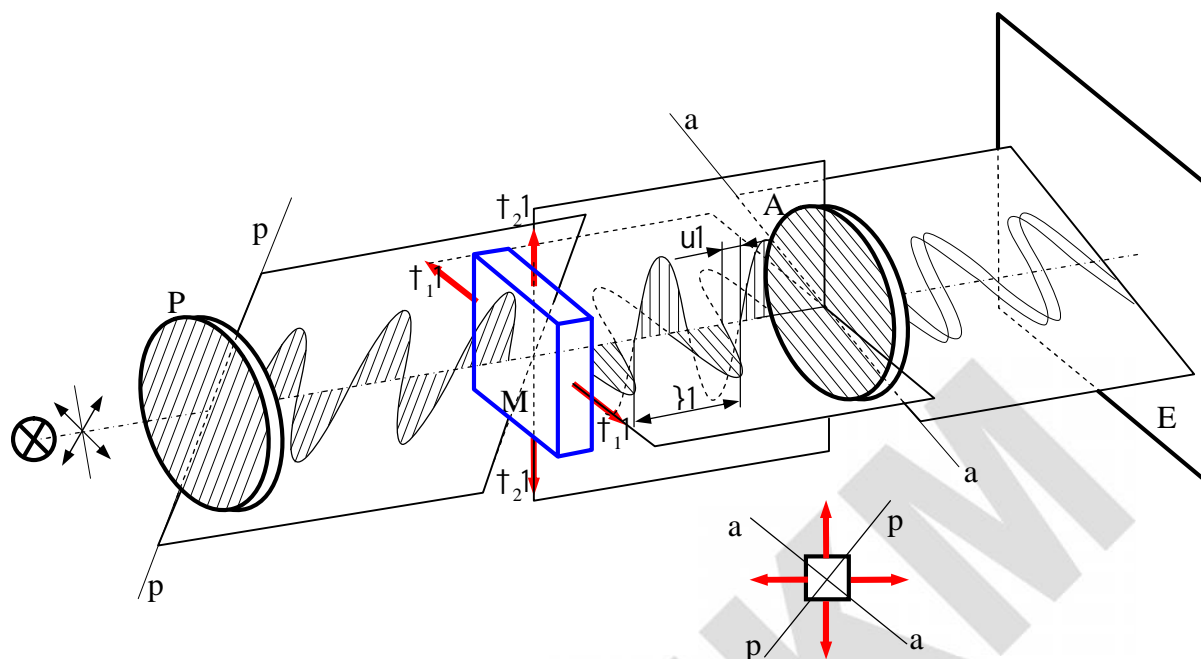
3.1 Polaryzacja, dwójłomność wymuszona

Polaryzacja światła polega na uporządkowaniu drgań promieni świetlnych. Polaryzacja polega na sprowadzeniu drgań promieni świetlnych do jednej płaszczyzny (po przejściu przez płytkę zwaną polaryzatorem) nosi nazwę *polaryzacji liniowej* (rys. 1).



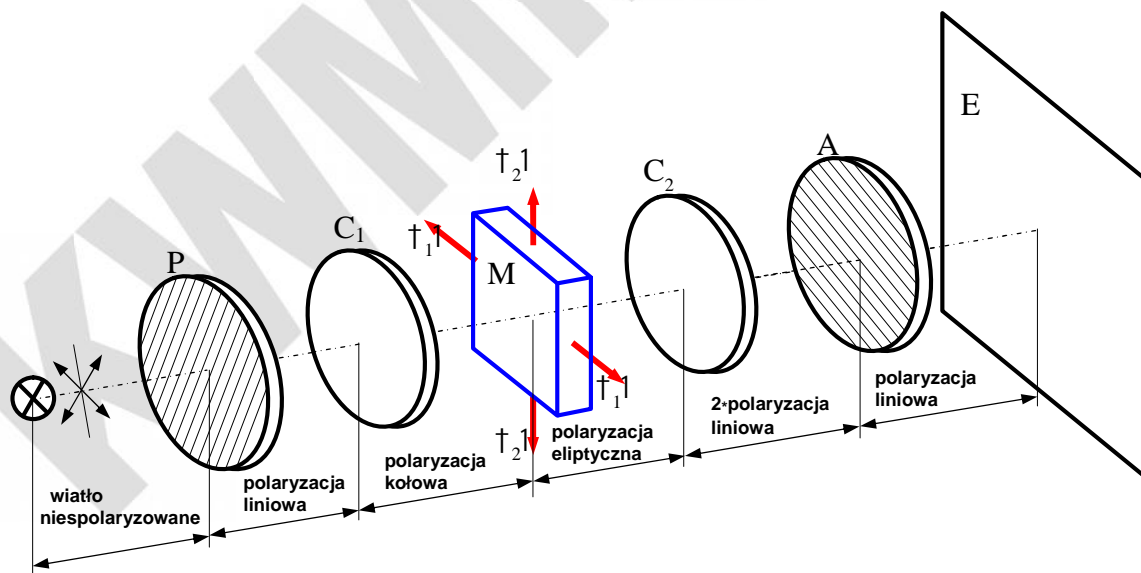
Rys. 1. Polaryzacja liniowa

Polaryskop liniowy składa się z: źródła światła, z polaryzatora P, analizatora A (bardziejego drugim polaryzatorem) i zespołu rejestrującego E. Ponadto pomiędzy polaryzatorem a analizatorem umieszczany jest badany model M (rys. 2).



Rys. 2. Działanie polaryskopu liniowego

Przez wprowadzenie do układu optycznego wierzalówek C_1 i C_2 uzyskuje się światło *spolaryzowane kołowo*, nie mające uprzywilejowanego kierunku (płaszczyzny) drga (rys. 3). W przypadku polaryzacji kołowej drgania promienia świetlnego zachodzą w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach. Amplitudy drga są jednakowe. Jeżeli amplitudy drga są różne, to mówi się o *polaryzacji eliptycznej*.

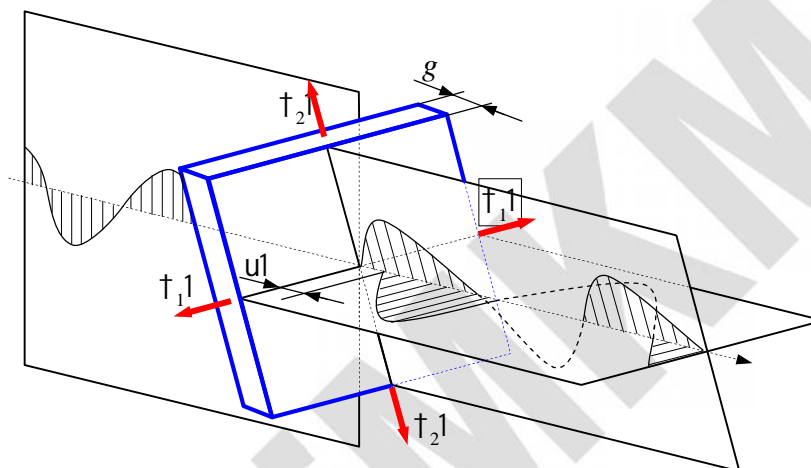


Rys. 3. Działanie polaryskopu kołowego

Promień świetlny liniowo spolaryzowany po przejściu przez wierzalówkę C_1 zostaje rozszczepiony na dwa promienie drgające w dwóch prostopadłych płaszczyznach. Po przejściu przez model M promienie świetlne zostają spolaryzowane eliptycznie. Ponieważ drgania eliptyczne można przedstawić w postaci sumy dwóch drgań spolaryzowanych kołowo, otrzymuje się po przepuszczeniu promieni przez następną wierzalówkę C_2 drgania spolaryzowane liniowo w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach.

Ustawiony odpowiednio analizator A sprowadza te drgania do jednej płaszczyzny i w efekcie otrzymuje się polaryzację liniową. Ten rodzaj polaryzacji powoduje znikanie we wzorze (6) czynnika $\sin^2\gamma$ i w efekcie na ekranie widać tylko obraz izochrom (nie występują izokliny).

Dwójłomność wymuszona jest zjawiskiem zachodzącym w niektórych materiałach przezroczystych pod wpływem obciążenia. Promień światła spolaryzowanego padający prostopadle na płytkę płasko-równoległą zostaje rozszczepiony na dwa promienie przesunięte w fazie, których drgania zachodzą w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach. Zachodzi to tylko w przypadku obciążenia układu i powstania naprężeń w płytce. Warto przesunięcia jest proporcjonalna do różnicy naprężeń głównych w płytce. W przypadku braku naprężeń (obciążenia) przesunięcia nie występuje. Ilustracją tego zjawiska przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Dwójłomność wymuszona

3.2 Zasady elastoptycznych pomiarów naprężeń

Nieuporządkowane drgania promieni świetlnych wychodzących ze źródła światła Z po przejściu przez polaryzator zostają sprowadzone do jednej płaszczyzny, tzw. płaszczyzny polaryzacji (rys. 6.2). Spolaryzowane wiązki światła padają następnie na model M ustawiony prostopadle do kierunku biegu promieni i rozszczepia się w każdym punkcie modelu na dwa spolaryzowane promienie składowe. Płaszczyzny drgań tych promieni są do siebie prostopadłe i zgodne z kierunkami naprężeń głównych τ_1 i τ_2 w danym punkcie modelu. Promienie składowe przebiegają przez model z różnymi prędkościami V_1 i V_2 , co w wyniku daje ich przesunięcia liniowe u , które zachowują po opuszczeniu płytki modelowej, biegąc z jednakową prędkością V .

Do wiadczalnie wykazano, że różnica prędkości rozszczepionych promieni spolaryzowanej wiązki światła jest proporcjonalna do różnicy naprężeń głównych w danym punkcie modelu.

$$V_1 - V_2 = C(\tau_1 - \tau_2) \quad (1)$$

Odpowiadające przesunięcia liniowe u wzrasta z grubości g modelu:

$$u = Cg(\tau_1 - \tau_2), \quad (2)$$

gdzie:

C – stała elastoptyczna materiału modelu;
 g – grubość cianki modelu.

Przesunięcie liniowe promieni świetlnych wyraża się najczęściej wielokrotnością długości fali świetlnej λ :

$$u = m\lambda \quad (3)$$

Podstawiając związek (3) do (2) otrzymuje się podstawowe równanie elastoptyki:

$$m = C \frac{g}{\lambda} (\tau_1 - \tau_2) \quad (4)$$

lub

$$\tau_1 - \tau_2 = mk_g, \quad (5)$$

gdzie:

$k_g = \frac{C}{g}$ – elastoptyczna stała modelowa [MPa];

m – rzęd izochromy.

Jeśli teraz wychodząc z danego punktu modelu wiązki promieni świetlnych przepuści się przez analizator A, którego oś tworzy kąt prosty z osią polaryzatora P, to promienie składowe zostaną sprowadzone do jednej płaszczyzny, interferując ze sobą przy zachowaniu stałego przesunięcia liniowego u . Wartość tego przesunięcia nie jest jednakowa dla wszystkich punktów modelu ze względu na różnicę na ogół wartości naprężeń τ_1 i τ_2 w różnych punktach. Ponieważ natężenie światła opuszczającego model jest równe:

$$I = I_0 \sin^2 2\gamma \sin^2 mf, \quad (6)$$

gdzie: I_0 – natężenie światła padającego na model.

to na ekranie otrzymamy układ jasnych i ciemnych pręg o jasności zależnej od przesunięcia liniowego u i kąta γ nachylenia osi polaryzacji do kierunku naprężenia normalnego głównego.

Całkowite wygaszenie promieni ($I = 0$) następuje wówczas, gdy jeden z kierunków naprężenia głównych pokryje się z płaszczyzną drgań promieni spolaryzowanych, tzn., gdy $\gamma = 0, \pi/2, \pi, \dots$ lub gdy przesunięcie liniowe ułb będzie równe całkowitej wielokrotności długości fali świetlnej, czyli $m = 0, 1, 2, \dots$

Analizując obraz otrzymany na ekranie rozróżnimy dwa typowe rodzaje pręg interferencyjnych, które wyznaczają pewne wielkości charakteryzujące stan naprężenia w modelu. Jeden rodzaj pręg określa miejsca geometryczne punktów, w których $(\tau_1 - \tau_2) = \text{const}$. Z zależności (6) wynika, że przypadek ten zachodzi dla $\sin mf = 0$, czyli dla $m = 0, 1, 2, \dots$ Ponieważ $(\tau_1 - \tau_2) = 2\tau_{max}$, to pręgi te są miejscami geometrycznymi punktów o jednakowych wartościach naprężeń stycznych. Dla światła monochromatycznego pręgi te stanowią ciemne linie, natomiast w świetle białym są liniami o jednakowej barwie, stąd pochodzi ich nazwa – *izochromy*.

Drugi rodzaj pręg interferencyjnych, zwanych *izoklinami*, określa miejsca geometryczne tych punktów modelu, w których kierunki naprężenia głównych pokrywają się z osiami analizatora i polaryzatora. Ze wzoru (6) wynika, że przypadek ten występuje, gdy $\sin 2\gamma = 0$, czyli $\gamma = n\pi/2$ dla $n = 0, 1, 2, \dots$

Kąt, jaki tworzy oś optyczna polaryzatora z osią układu odniesienia, nazywamy *parametrem izokliny*. Aby znaleźć kierunki naprężenia głównych w każdym punkcie modelu należy rejestrować izokliny zmieniając kąt dorazowo parametr izokliny w granicach od 0° do 90° .

Biorąc pod uwagę, że mf nie zależy od kąta γ , jednoczesny obrót polaryzatora i analizatora nie powoduje zmiany położenia izochrom, a jedynie przemieszczenie izoklin. Przy świetle białym izokliny są widoczne jako ciemne linie na tle barwnych izochrom, ponieważ wygaszanie

promienia świetlnego zależy tylko od orientacji kierunków głównych. Znając izokliny pozwala wykreślić trajektorie naprężeń głównych, czyli linie wzajemnie ortogonalne, mające tę własność, że styczne do nich w dowolnym punkcie wyznaczają kierunki naprężeń głównych.

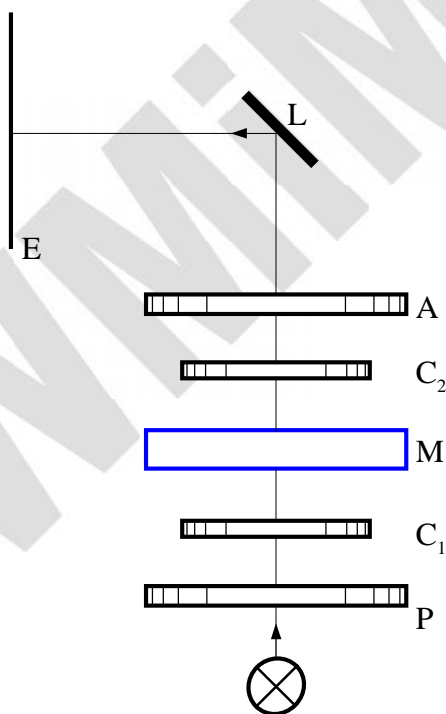
3.3 Aparatura pomiarowa

Polaryskop optyczny zastosowany w ćwiczeniu działa z wykorzystaniem źródła światła zainstalowanego w rzutniku pisma. Zestaw optyczny nakładany jest na stolik rzutnika. Zasadniczymi częściami polaryskopu elastoptycznego przedstawionego na rys. 5 są:

- układ optyczny;
- urządzenie obciążające;
- zespół rejestrujący.

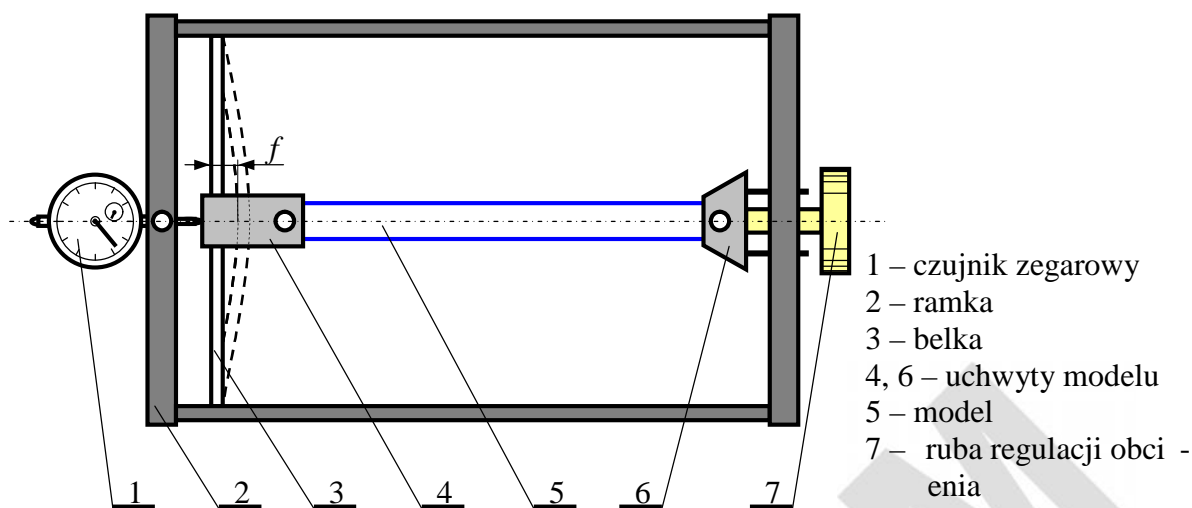
W skład układu optycznego wchodzi:

- źródło światła Z;
- polaryzator P;
- dwie falówki C_1 i C_2 ;
- analizator A;
- lustro L;
- zespół rejestrujący E.



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego

Zespół rejestrujący E stanowi tu ekran, na którym można obserwować izochromy i izokliny. Istnieje możliwość lenia tych linii np. za pomocą ołówka na kalce. Urządzenie obciążające (rys. 6) ma zapewnić realizację wymaganych warunków zamocowania i obciążenia badanego modelu.



Rys. 6. Urządzenie obciążające

3.4 Wyznaczanie elastoptycznej stałej modelowej

Elastoptyczną stałą modelową wyznacza się z podstawowego równania elastoptyki:

$$\tau_1 - \tau_2 = mk_g \quad (7)$$

poddajmy jednoosiowemu rozciąganiu siłą P pręt o stałym przekroju A . W każdym punkcie pręta, zgodnie z teorią rozciągania, wystąpi jednakowe naprężenie τ_1 ($\tau_2 = 0$), co daje na ekranie obraz izochrom w postaci jednobarwnego obszaru, wypełniającego cały kontur pręta. Zwiększając siłę rozciągającą powoduje się wzrost rzędu izochromy m . Kolejne jednolite barwy wystąpią przy $m = 1, 2, 3, \dots$

Dla kolejnych wartości m_i określa się elastoptyczną stałą modelową k_{gi} , a następnie wyznacza się wartość średnią:

$$k_g = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n k_{gi} = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{Am_i}, \quad (8)$$

gdzie:

$$\frac{P_i}{A} = \tau_{li} \quad (9)$$

Wyznaczona wartość elastoptycznej stałej modelowej jest (przy niezmiennym rodzaju wiązki) taka sama dla wszystkich modeli pręta rozciąganych, wykonanych z tego samego materiału i posiadających tę samą grubość.

3.5 Wyznaczanie naprężenia na brzegu otworu i na krawędzi pręta

Na swobodnym brzegu otworu, jak też na zewnętrznej krawędzi pręta jedno z naprężeń głównych jest równe zero. Gdy przy danym obciążeniu w jednym z punktów na swobodnym brzegu rząd izochromy wynosi m oraz $\tau_2 = 0$, wówczas naprężenie τ_1 wyniesie:

$$\tau_1 = \tau = mk_g \quad (10)$$

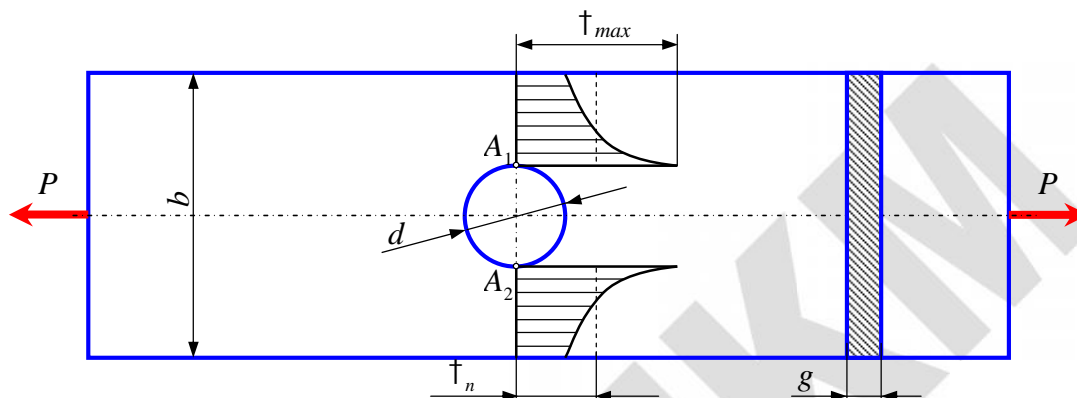
3.6 Wyznaczanie współczynnika kształtu dla przekroju pręta osłabionego otworem kołowym

Współczynnik kształtu wyraża stosunek maksymalnych naprężeń w danym przekroju do naprężeń nominalnych:

$$r_k = \frac{\tau_{max}}{\tau_n} \quad (11)$$

Naprężenia nominalne τ_n to naprężenia w przekroju osłabionym (rys. 6.7) określone jako iloraz siły i pola powierzchni osłabionego przekroju:

$$\tau_n = \frac{P}{(b-d)g} \quad (12)$$



Rys. 7. Wyznaczanie wsp. kształtu dla przekroju osłabionego otworem kołowym

Naprężenia maksymalne wyznacza się określając rz d izochromy w punkcie A_1 lub A_2 i korzystając z podstawowego równania elastoptyki.

4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

4.1 Wyznaczanie elastoptycznej stałej modelowej

Badany próbek (płaskownik) mocowany jest dwoma końcami w uchwytach urządzenia obciążającego (rys. 6.6). Jeden z uchwytów pochodzi z tworzywa, której odkształcenie wywołuje rozciąganie próbki. Drugi uchwyt pochodzi z stalowej belki pełniący rolę siłomierza. Siła rozciągająca badany próbek powoduje zginanie belki. Strzałka ugięcia f belki rejestrowana jest za pomocą czujnika zegarowego.

W ramach ćwiczenia należy:

1. Zmierzyć niezależnie do obliczeń wielkość cięcia i zamieścić je w tab. 1.
2. Wyłączyć źródło światła.
3. Ustawić polaryzator i analizator tak, aby ich osie były skrzyżowane pod kątem 90° .
4. Ustawić zwierciadła tak, by tworzyły z osiami polaryzatora i analizatora kąty 45° .
5. Zamocować model w urządzeniu obciążającym.
6. Stopniowo obciążać model i odczytywać strzałki ugięcia dla kolejnych rzędów izochrom (kolejno kolory: żółty dla $m = 1$, czerwony dla $m = 2$, niebieski dla $m = 3$, żółty dla $m = 4$ itd.). Wyniki zamieścić w tab. 1.
7. Odczytać model i wyłączyć źródło światła.

Tabela 1

Dł. belki między podporami (l) [mm]		Szerokość płaskownika (a) [mm]	
Wysokość belki (h) [mm]		Grubość płaskownika (b) [mm]	
Szerokość belki (b) [mm]			
Rz. d. izochromy	Strzałka ugięcia f [mm]	Rz. d. izochromy	Strzałka ugięcia f [mm]
1		4	
2		5	
3		...	

4.2 Wyznaczanie naprężenia na nieobciążonym brzegu modelu

Badany model (modele) jest mocowany w urządzeniu obciążającym (rys. 6) i poddany rozciąganiu dowolną siłą. Czujnik do pomiaru strzałki ugięcia nie jest używany w tej części ćwiczenia.

W ramach ćwiczenia należy dla każdego badanego modelu:

1. Odrysować kontury modelu po przyłożeniu go do kartki papieru.
2. Zaznaczyć na rysunku punkty na nieobciążonym brzegu modelu wskazane przez prowadzącego ćwiczenie.
3. Włączyć źródło światła.
4. Zamocować model w urządzeniu obciążającym.
5. Określić rzędy izochrom i odpowiadające im kolory w podanych punktach. Wyniki zamieścić w tab. 2.
6. Odczytać model i wyłączyć źródło światła.

Tabela 2

Punkt	Rz. d. izochromy	Kolor
1		
2		
...		

4.3 Wyznaczanie współczynnika kształtu

Badany model (modele) jest mocowany w urządzeniu obciążającym (rys. 6) i poddawany rozciąganiu. Strzałka ugięcia (niezbędna do określenia naprężenia nominalnych σ_n) jest mierzona za pomocą czujnika zegarowego.

W ramach ćwiczenia należy dla każdego badanego modelu:

1. Odrysować kontury modelu po przyłożeniu go do kartki papieru.
2. Włączyć źródło światła.
3. Zamocować model w urządzeniu obciążającym.
4. Obciążyć model i odczytać rzędy izochrom w interesujących punktach (na koncentracjach naprężenia w postaci otworów – np. punkt A_1 jak na rys. 7) oraz wartości strzałki ugięcia. Wyniki zamieścić w tab. 3.
5. Odczytać model i wyłączyć źródło światła.

Tabela 3

Punkt	Rz d izochromy	Strzałka ugi cia
1		
2		
...		

5. OPRACOWANIE WYNIKÓW I WYTYCZNE DO SPRAWOZDANIA

Sprawozdanie powinno zawierać :

- I. Cel wiczenia
- II. Wst p teoretyczny, a w nim:
 - 1 - definicje izochromy i izokliny,
 - 2 - istot polaryzacji liniowej i kołowej,
 - 3 - schemat polaryskopu elastoptycznego z polaryzacji kołowej .
- III. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania stałej modelowej.
- IV. Wyprowadzenie zależno ci pomi dzy strzałką ugi cia f a siłą rozciągającą P model P
- V. Cz obliczeniow , w której nale y:
 1. Wyznaczyć elastoptyczną stałą modelową .
 2. Obliczyć napr enia w zadanych nieobciążonych punktach modelu.
 3. Obliczyć współczynnik (współczynniki) kształtu.
- VI. Wnioski z wiczenia.

6. PRZYKŁADOWE PYTANIA KONTROLNE

1. Jaki jest cel wiczenia?
2. Co to jest elastoptyka?
3. Jakie zjawisko optyczne wykorzystuje się w elastoptycznych badaniach modelowych i na czym ono polega?
4. WyjaŹnij znaczenie poj : izoklina, izochroma, dwójłomno wymuszona, polaryzacja liniowa, polaryzacja kołowa.
5. Poda zależno ci pomi dzy napr eniami a rz dem izochromy. Omówi sposób wyrowadzania tego wzoru.
6. Jaka jest ró nica pomi dzy elastoptyczną stałą modelową a elastoptyczną stałą materiałów ? Omówi sposób ich wyznaczania.
7. Jak wygl daj izokliny a jak izochromy w przypadku polaryzacji liniowej i kołowej dla wiatła białego i monochromatycznego?
8. Narysowa i omówi schemat liniowego i kołowego polaryskopu elastoptycznego.
9. Co to jest współczynnik kształtu i jak go wyznaczamy?

7. LITERATURA

1. Beluch W., Burczyński T., Fedeliński P., John A., Kokot G., Ku W.: *Laboratorium z wytrzymałości materiałów*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Skrypt nr 2285, Gliwice, 2002.
2. Błak R., Burczyński T.: *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*, WNT, Warszawa 2001.
3. Boruszak A., Sygulski R., Wrzeński K.: *Wytrzymałość materiałów. Doświadczalne metody badania*, PWN, Warszawa 1984.
4. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłowski Z.: *Wytrzymałość materiałów*, t. I-II, WNT, Warszawa 1996-97.
5. Katarzyński S., Kocuda S., Zakrzewski M.: *Badanie własności mechanicznych metali*, PWT, Warszawa 1956.
6. Pindera J.T.: *Zarys elastooptyki*, PWT, Warszawa 1953.