

7. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA INTENSYWNOŚCI NAPRĘŻEŃ METODĄ „CAUSTICS”*

Cieniowa optyczna *metoda caustics* jest względnie nową metodą stosowaną w analizie naprężeń i odkształceń elementów konstrukcyjnych. Została zapoczątkowana przez Manogga [1] w 1964 r. Metodę rozwijali Theocaris [2], [3], Rosakis [4], [5] oraz Kalthoff [6], [7]. Stosowali oni różnorodne warunki obciążenia oraz różne materiały dla przypadków statycznych i dynamicznych.

Metoda caustics jest czuła na **gradienty naprężeń** i dlatego też jest przydatnym narzędziem do pomiaru koncentracji naprężeń. W szczególności wykorzystywana jest do wyznaczania współczynnika intensywności naprężeń w wierzchołku szczeliny.

Pod wpływem naprężeń wywołanych przez obciążenia zewnętrzne zmieniają się właściwości optyczne ciał przepuszczających światło oraz grubość ciała na skutek efektu Poissona. Powyższe zmiany wykorzystywane są w *metodzie caustics* przy wyznaczaniu naprężeń w otoczeniu wierzchołka szczeliny.

7.1. PODSTAWY TEORETYCZNE METODY CAUSTICS

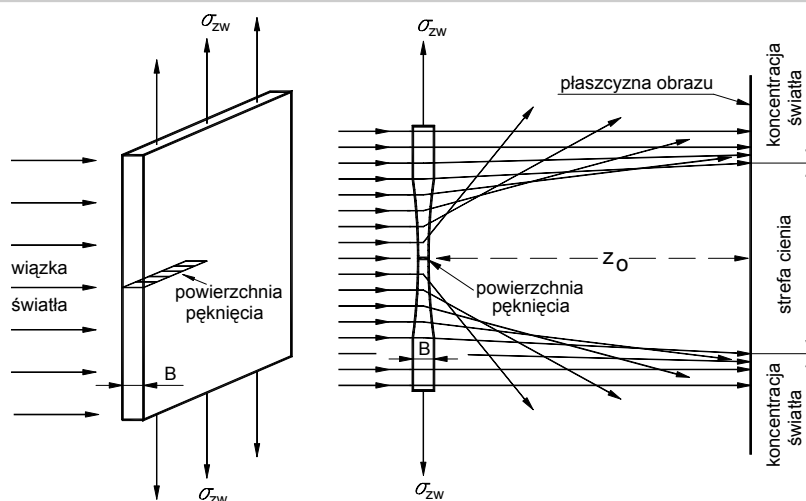
Założmy, że próbkę ze szczeliną będziemy poddawać rozciąganiu. Dla lepszego zobrazowania fizyki tego zjawiska rozpatrzmy próbkę przepuszczającą światło. Próbka jest oświetlana wiązką światła równoległego. Na skutek koncentracji naprężeń wokół wierzchołka szczeliny, zbliżając się w kierunku wierzchołka, grubość próbki maleje (efekt Poissona) a załamanie światła się zwiększa (wg prawa Maxwella-Neumana). Tak więc promień świetlny przechodzący przez próbkę bliżej wierzchołka szczeliny ulega większemu ugięciu na zewnątrz od wierzchołka szczeliny. Powierzchnia wokół wierzchołka szczeliny tworzy soczewkę rozbieżną. Konsekwencją tego jest pojawienie się na ekranie w odległości z_0 od próbki ciemnej powierzchni otoczonej przez obraz silnej koncentracji światła.

Schemat powstawania obszaru cienia na skutek istniejącego pęknięcia przedstawiono na rysunku 7.1.

Metoda Caustics może być użyta do ilościowego opisu intensywności naprę-

* Opracował: Robert Molasy

żeń wokół wierzchołka szczeliny. Może być stosowana dla dowolnego sposobu obciążania próbki. Można wykorzystywać próbki przepuszczające światło, jak również próbki, od których światło się odbija.



Rys. 7.1. Schemat powstawania obszaru cienia

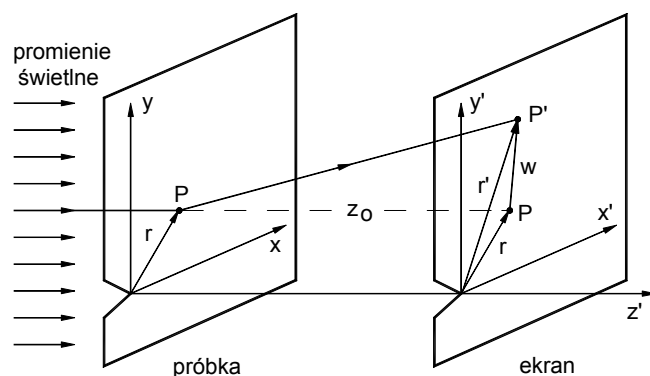
Charakterystyczną właściwością promieni świetlnych przechodzących przez próbkę jest: im bliżej wierzchołka szczeliny przechodzą promienie, tym większy jest kąt ugięcia tych promieni. Promienie padając na ekran, tworzą ciemną powierzchnię wokół wierzchołka szczeliny, która jest ograniczona jasnym obszarem. Linie graniczną pomiędzy tymi dwoma obszarami nazywamy **krzywą caustics**.

Rozważmy teraz próbkę wykonaną ze stali z wypolerowaną powierzchnią. Na skutek efektu Poissona koncentracja naprężeń powoduje wklęsnięcie przy wierzchołku szczeliny, które działa podobnie jak zwierciadło wklęsłe. Tak więc promienie świetlne zostają odbite w kierunku linii środkowej. Gdy padną na ekran utworzą również strefę cienia. Przedłużenia tych promieni (tak, jak gdyby przechodziły przez próbkę) nakreślają pozorny obraz taki, jak w przypadku przechodzenia światła przez próbkę.

Promienie świetlne, które bezpośrednio padają wzdłuż *krzywej caustics* w płaszczyźnie obrazu są szczególnie ważne i nazywane są *źródłowymi* promieniami świetlnymi. Lokalizacja wszystkich punktów, gdzie *źródłowe* promienie świetlne przechodzą przez próbkę nazywa się *krzywą źródłową*. Promienie świetlne, przechodzące przez próbkę w punktach porównywanych z *krzywą źródłową*

bliżej (lub dalej) wierzchołka szczeliny są uginane bardziej (lub mniej) niż *promienie źródłowe*. Konsekwencją obydwu tych przypadków jest to, że punkty obrazu leżą poza *krzywą caustics*.

Krzywa *caustics* leżąca w płaszczyźnie obrazu jest bezpośrednim odwzorowaniem krzywej źródłowej leżącej w płaszczyźnie przedmiotu.



Rys. 7.2. Schemat ugięcia promienia światelnego w trakcie przejścia przez obciążoną próbkę

Ugięcie promieni świetlnych można precyzyjnie opisać w oparciu o znane prawa fizyki. Rozpatrzmy promień świetlny przechodzący przez próbkę w punkcie $P(r)$ (rys. 7.2), gdzie r jest odległością od wierzchołka szczeliny. Gdy próbka nie jest obciążona promień ten nie doznaje ugięcia i na ekranie pojawia się w tej samej odległości r od wierzchołka szczeliny co w płaszczyźnie próbki. Na skutek odkształceń występujących w próbce po jej obciążeniu promień świetlny ulega ugięciu i przecina płaszczyznę obrazu w punkcie $P'(r')$ z przesunięciem równym w .

$$\text{Tak więc mamy:} \quad r' = r + w \quad (7.1)$$

Kierunek i wielkość wektora przemieszczenia w są zależne od zmiany długości drogi optycznej Δs , którą promień świetlny przebywa w próbce. Zmiana długości drogi optycznej Δs wynika ze zmiany grubości próbki i zmiany współczynnika załamania światła. Dla promieni świetlnych przechodzących przez próbkę

$$\Delta s_{1,2} = (n - 1) \cdot \Delta B_{eff} + B_{eff} \cdot \Delta n_{1,2} \quad (7.2)$$

gdzie:

- B_{eff} – efektywna grubość próbki,
- n – współczynnik załamania światła,

$n_{1,2}$ – współczynnik załamania światła wzdłuż kierunków głównych tensora naprężeń.

Dla światła przechodzącego $B_{eff} = B$, zaś dla światła odbitego $n = -1$, $B_{eff} = B/2$.

Zmiana wartości współczynnika załamania światła Δn wywołana przez naprężenia główne jest opisana przez prawo Maxwella–Neumana:

$$\Delta n_{1,2} = A \cdot \sigma_{1,2} + D \cdot (\sigma_{2,1} + \sigma_3) \quad (7.3)$$

gdzie:

A, D – stałe materiałowe, (zapis $n_{1,2}$ należy rozumieć jako n_1 lub n_2).

Dla ciała optycznie izotropowego, niekrystalicznego $A = D$, a dla przypadku odbicia światła $A = D = 0$.

Zmianę ΔB_{eff} wywołaną przez naprężenia opisuje prawo Hooke’a, które zapisujemy w postaci:

$$\Delta B_{eff} = \left[\frac{1}{E} \cdot \sigma_3 - \frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \cdot B_{eff} \quad (7.4)$$

Dla płaskiego stanu naprężeń $\sigma_3 = 0$ a dla płaskiego stanu odkształceń $\Delta B_{eff} = 0$.

Wstawiając (7.3) i (7.4) do równania (7.2) otrzymujemy:

$$\Delta s_{1,2} = c \cdot B_{eff} \cdot [(\sigma_1 + \sigma_2) \pm \lambda \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)] \quad (7.5)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} c &= \frac{A+D}{2} - \frac{(n-1) \cdot \nu}{E} & \lambda &= \frac{A-D}{A+D-2 \cdot (n-1) \cdot \nu / E} & \text{p.s.n.} \\ c &= \frac{A+D}{2} + \nu \cdot D & \lambda &= \frac{A-D}{A+D+2 \cdot \nu \cdot D} & \text{p.s.o.} \end{aligned}$$

Stała c nazywana jest *stałą cieniowo–optyczną* i wpływa bezpośrednio na zmianę optycznej długości drogi w zależności od stosowanego materiału próbki oraz sposobu obciążenia.

Współczynnik

λ wpływa na zmianę optycznej długości drogi w zależności od stopnia anizotropii ciała ($A \neq D$).

Podstawiając wzory (6.1) na naprężenia dla I sposobu obciążenia do (7.5) otrzymamy:

$$\Delta s = 2 \cdot B_{eff} \cdot c \cdot \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\Theta}{2} + \dots \quad (7.6)$$

Obliczając $\text{grad}\Delta s(r, \Theta)$, ze wzorów (7.1) i (7.2) otrzymamy współrzędne położenia punktu P' :

$$\begin{aligned} x' &= r \cdot \cos \Theta + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \cdot z_0 \cdot c \cdot B_{eff} \cdot r^{-3/2} \cdot \cos\left(\frac{3}{2}\Theta\right), \\ y' &= r \cdot \sin \Theta + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \cdot z_0 \cdot c \cdot B_{eff} \cdot r^{-3/2} \cdot \sin\left(\frac{3}{2}\Theta\right) \end{aligned} \quad (7.7)$$

Odwzorowanie krzywej *caustics* nie jest jednoznaczne, ponieważ do jednego punktu na ekranie dociera więcej niż jeden promień świetlny.

Dlatego też warunkiem koniecznym i wystarczającym istnienia krzywej *caustics* jest, aby zniknął Jakobian równań (7.7):

$$\frac{\partial x'}{\partial r} \frac{\partial y'}{\partial \Theta} - \frac{\partial x'}{\partial \Theta} \frac{\partial y'}{\partial r} = 0 \quad (7.8)$$

Wstawiając równanie (7.7) do (7.8) otrzymujemy równanie *krzywej źródłowej*:

$$r = \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \cdot |z_0| \cdot |c| \cdot B_{eff} \right]^{2/5} \equiv r_0 \quad (7.9)$$

gdzie:

r_0 – promień krzywej źródłowej nakreślonej wokół wierzchołka szczeliny.

Z matematycznego punktu widzenia krzywa *caustics* jest epicykloidą. Na rysunku 7.3 przedstawiono graficzny obraz krzywej *caustics* w płaszczyźnie obrazu.

Charakterystycznym parametrem krzywej *caustics* jest maksymalny wymiar krzywej oznaczony przez D . Wymiar D odniesiony do promienia źródłowego dla I sposobu obciążenia dany jest wzorem:

$$D = 3.17 \cdot r_0 \quad (7.10)$$

Wykorzystując równania (7.10) i (7.11) otrzymujemy:

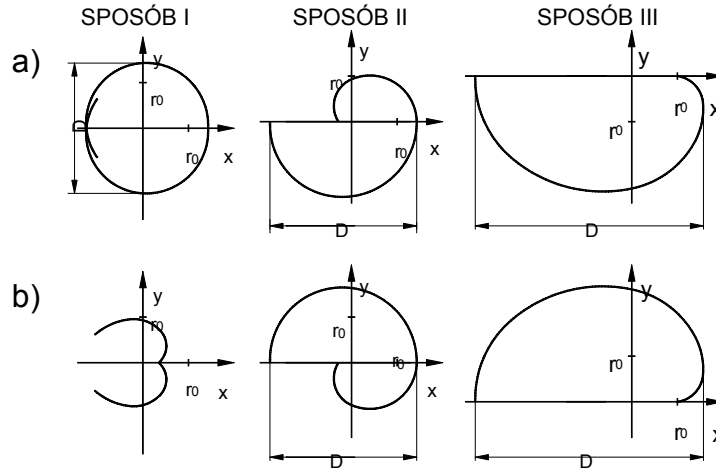
$$K_I = \frac{2 \cdot \sqrt{2\pi}}{3 \cdot (3.17)^{5/2} \cdot z_0 \cdot c \cdot B_{eff}} \cdot D^{5/2} \quad (7.11)$$

Analogicznie wzory dla II i III sposobu obciążenia są następujące:

$$D = 3.06 \cdot r_0, \quad D = 4.5 \cdot r_0 \quad (7.10a)$$

$$K_{II} = \frac{2 \cdot \sqrt{2\pi}}{3 \cdot (3.06)^{5/2} \cdot z_0 \cdot c \cdot B_{eff}} \cdot D^{5/2} \quad K_{III} = \frac{\mu \cdot \sqrt{2\pi}}{(4.5)^{3/2} \cdot z_0} \cdot D^{3/2} \quad (7.11a)$$

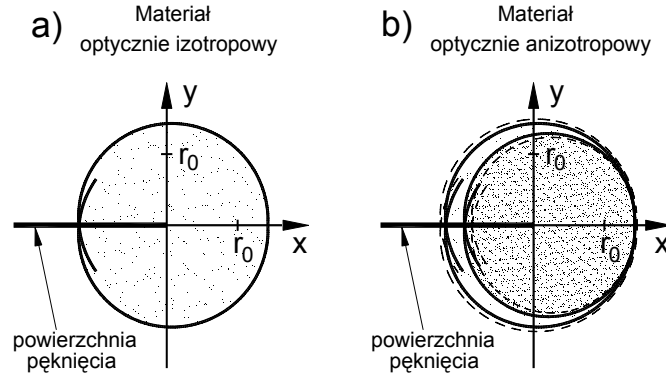
gdzie μ jest stałą sprężystości a wymiar D należy mierzyć wzdłuż płaszczyzny położenia szczeliny, tak jak na rysunku 7.3a i b.



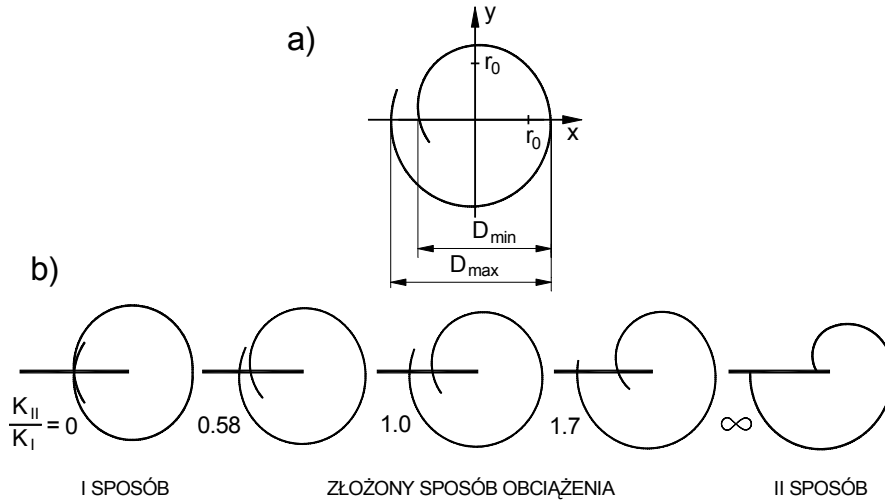
Rys. 7.3. Krzywe *caustics* w zależności od sposobu obciążenia: a) dla światła przechodzącego, b) dla światła odbitego

W ciałach przepuszczających światło wykazujących anizotropię ($\lambda \neq 0$) krzywa *caustics* rozdziela się na dwie krzywe. Na rys. 7.4 pokazano taki właśnie przypadek dla I sposobu obciążenia w porównaniu z *caustics* pojedynczą.

Współczynnik anizotropii $|\lambda|$ dla płaskiego stanu odkształcenia ma większą wartość niż dla płaskiego stanu naprężenia. Im jest większy tym większe jest oddzielenie podwójnej krzywej *caustics*.



Rys. 7.4. Krzywa *caustics* dla materiału: a) izotropowego, b) anizotropowego



Rys. 7.5. Krzywa *caustics* dla złożonego sposobu obciążenia:

a) definicja D_{max} i D_{min} , b) kształty krzywej w zależności od współczynnika μ^*

Zarówno zewnętrzna, jak i wewnętrzna krzywa *caustics* może być używana do określenia współczynnika intensywności naprężeń zgodnie ze wzorem:

$$K_I = \frac{2 \cdot \sqrt{2\pi}}{3 \cdot (f_{o,i})^{5/2} \cdot z_0 \cdot c \cdot B_{eff}} \cdot D_{o,i}^{5/2} \quad (7.12)$$

gdzie:

$D_{o,i}$ – zewnętrzna (D_o), wewnętrzna (D_i) średnica krzywej *caustics*,
 $f_{o,i}$ – współczynnik numeryczny.

Wartości współczynnika $f_{o,i}$ są bliskie wartości 3.17. Konkretnie jego wartości w funkcji współczynnika anizotropii można znaleźć np. w [8] rozdział 6.5.

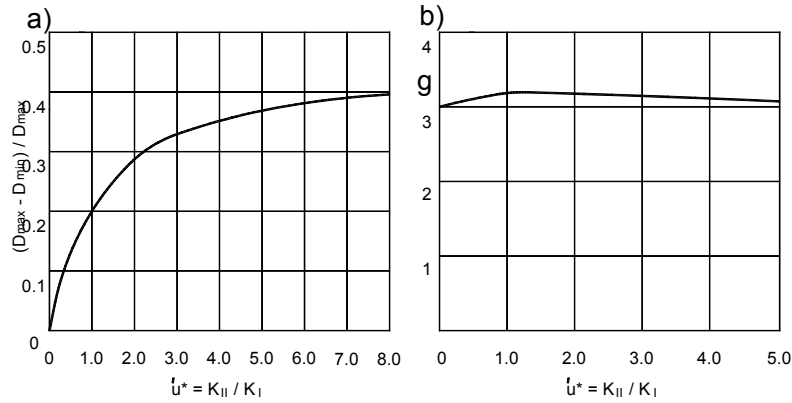
Krzywą *caustics* możemy otrzymać także dla złożonego stanu obciążenia, tzn. $0 \leq K_{II}/K_I \leq \infty$. Używamy wtedy współczynnika μ^* , który określa ilościowy wpływ współczynnika intensywności naprężeń dla II sposobu w odniesieniu do współczynnika intensywności naprężeń dla I sposobu.

Dla przypadku złożonego sposobu obciążenia współczynniki intensywności naprężeń określamy w zależności od wielkości D_{max} z poniższych wzorów:

$$K_I = \frac{2 \cdot \sqrt{2\pi}}{3 \cdot g^{5/2} \cdot z_0 \cdot c \cdot B_{eff}} \cdot D_{max}^{5/2} \quad (7.13)$$

$$K_{II} = \mu^* \cdot K_I \quad (7.14)$$

gdzie g i μ^* można odczytać z wykresów na rys. 7.6.



Rys. 7.6. Wykresy dla określenia: a) współczynnika μ^* , b) współczynnika g

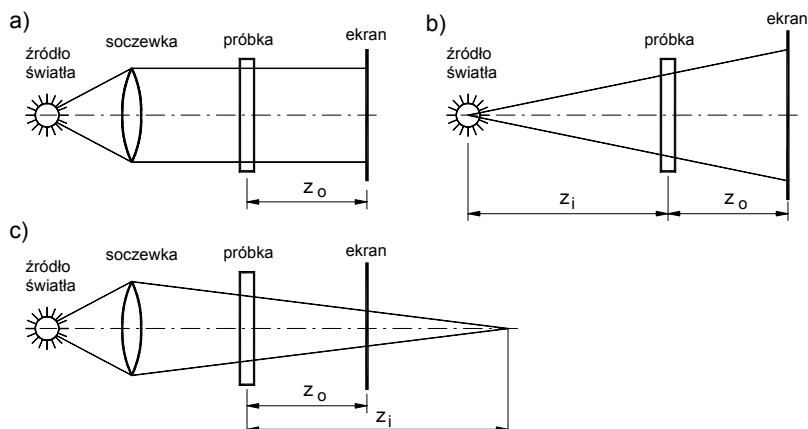
Należy podkreślić, że wyprowadzone wcześniej wzory prawdziwe są dla równoległej wiązki światła. Wymaganie dotyczące równoległości wiązki nie jest jednak konieczne. Doświadczenie można przeprowadzić dla wiązek rozbieżnych i zbieżnych, jak przedstawiono na rys. 7.7. W przypadku wiązki równoległej nie obserwuje się ani powiększenia, ani pomniejszenia obrazu. Współczynnik skali obrazu m dla wiązki równoległej równa się jedności, natomiast dla wiązki rozbieżnej wynosi:

$$m = \frac{z_0 + z_i}{z_i} > 1 \quad (7.15)$$

a dla wiązki zbieżnej:

$$m = \pm \frac{z_0 - z_i}{z_i} < 1 \quad (7.16)$$

gdzie z_0 i z_i pokazano na rys. 7.7.



Rys. 7.7. Schemat oświetlenia próbki:

a) wiązką równoległą, b) wiązką rozbieżną, c) wiązką zbieżną

Wyprowadzone wzory oparto na założeniu płaskiego stanu naprężenia bądź odkształcenia. Dla takich stanów określono też stałe optyczne A , B , c . Tak więc krzywa źródłowa powinna leżeć w obszarze w którym występuje płaski stan odkształceń bądź płaski stan naprężeń. Płaski stan odkształceń jest trudny do osiągnięcia. Występuje on w bardzo małej odległości od wierzchołka szczeliny, wewnątrz próbki. W dalszej odległości pojawia się trójosiowy stan naprężenia i odkształcenia. Po przekroczeniu pewnej krytycznej odległości od wierzchołka szczeliny dominuje płaski stan naprężenia. Ten zmieniający się stan naprężenia i odkształcenia w sąsiedztwie wierzchołka szczeliny utrudnia doświadczalne wyznaczenie współczynnika intensywności naprężenia. Jednoznaczne (zgodne z teorią) wyniki uzyskuje się jedynie wtedy, gdy krzywa źródłowa leży całkowicie w płaskim stanie naprężenia.

Problem płaskiego stanu naprężenia w pobliżu wierzchołka szczeliny po raz pierwszy był akcentowany przez Leviego [8]. Wykorzystując metodę elementów skończonych dla próbki o skończonej grubości ze szczeliną obliczył on, iż główne naprężenia normalne prostopadłe do płaszczyzny próbki dążą do zera dla odległości równych połowie grubości próbki od wierzchołka szczeliny. Z tych rezultatów (jak również z innych) wynika, że płaski stan naprężenia w pobliżu wierzchołka

szczeliny dominuje w odległości większej niż połowa grubości próbki. Tam też powinna się znajdować krzywa źródłowa. Na wielkość krzywej *caustics*, a więc i krzywej źródłowej mają wpływ: poziom obciążenia, geometria próbki oraz właściwości optyczne. Od tych wielkości zależeć więc będzie poprawność rezultatów.

Wynik będzie poprawny, gdy:

$$r_0 > B / 2 \quad (7.17)$$

czyli

$$(3.3854 \cdot z_0 \cdot c \cdot K_I)^{2/3} > B \quad (7.18)$$

Uwzględniając zaś współczynnik skali m

$$r_0 = \left(\frac{3.3854 \cdot z_0 \cdot c \cdot B_{eff} \cdot K_I}{m} \right)^{2/3} > B \quad (7.19)$$

W celu uzyskania krzywej źródłowej w obszarze, gdzie dominuje płaski stan naprężenia należy stosować duże obciążenia, małe grubości próbek oraz większe odległości ekranu od próbki. Więcej informacji na temat wyznaczania współczynnika intensywności naprężenia metodą *caustics* można znaleźć w [7], [9], [10].

7.2. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z metodą *caustics*, wykorzystywaną do określania współczynnika intensywności naprężeń w płaskim stanie naprężenia dla różnych sposobów obciążenia (I sposób, II sposób oraz sposób mieszany) oraz porównanie wyników uzyskanych doświadczalnie z obliczeniami teoretycznymi.

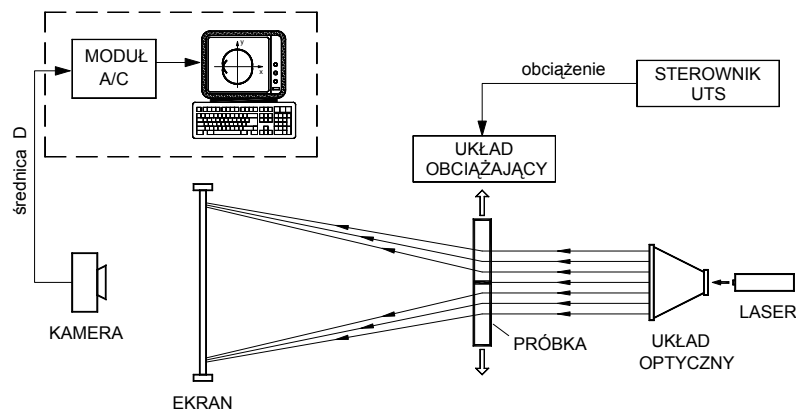
7.3. STANOWISKO BADAWCZE

Schemat stanowiska badawczego pokazano na rysunku 7.8.

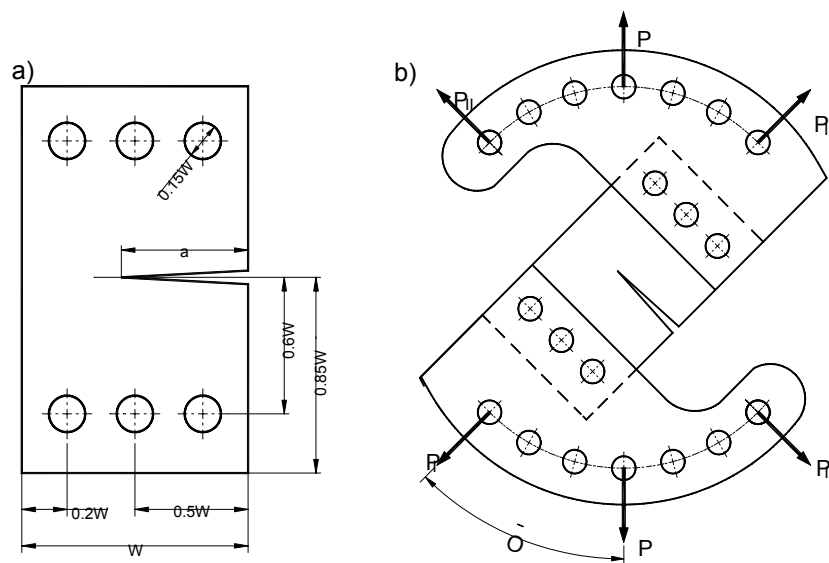
Próbka przepuszczająca światło (rys. 7.9a) zamocowana w uchwycie Richarda (rys. 7.9b), poddawana jest obciążeniu za pomocą maszyny testującej. Sterowanie odbywa się programowo za pomocą sterownika (TestSystem UTS) w warunkach kontrolowanej siły. Średnica wiązki jednorodnego światła ulega powiększeniu 20x za pomocą układu optycznego. Wiązka światła o średnicy ok. 30 mm oświetla cen-

tralnie wierzchołek pęknięcia. Za próbką w odległości z_o umieszczony jest szklany ekran z naniesioną podziałką. Dalej znajduje się kamera.

Wielkością wyjściową w doświadczeniu jest wymiar D krzywej *caustics*, na podstawie którego wyznacza się wartość współczynnika intensywności naprężeń.



Rys. 7.8. Schemat stanowiska do określania K metodą *caustics*



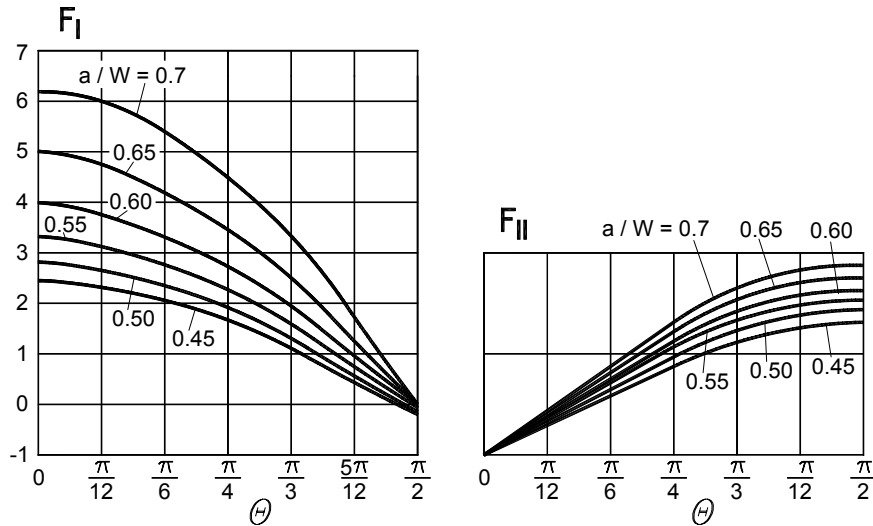
Rys. 7.9. Geometria próbki typu CTS (a), uchwyt Richarda (b)

Uchwyt Richarda umożliwia uzyskanie różnych sposobów obciążenia próbki (I, II oraz złożony sposób).

Próbkę przedstawioną na rys. 7.9 będzie się wykorzystywać do obliczenia współczynnika intensywności naprężeń dla różnego kąta Θ , przy stałej długości szczeliny początkowej a_0 . Natomiast w celu określenia wpływu długości szczeliny początkowej na wartość K_I wykorzystywane będą próbki zwarte, których geometria przedstawiona jest na rys. 6.6.

7.4. WYZNACZENIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA INTENSYWNOŚCI NAPRĘŻEŃ

Wyznaczenie wartości współczynnika intensywności naprężeń wykonuje się po przeprowadzeniu doświadczenia i zarejestrowaniu obrazu krzywej *caustics* dla różnych wartości siły obciążającej oraz dla różnych odległości ekranu od próbki.



Rys. 7.10. Wartości współczynników F_I i F_{II} w zależności od a/W i kąta Θ

W przypadku stosowania próbki CTS (rys. 7.9a) w pierwszej kolejności wyznaczamy wartości współczynników intensywności naprężeń na podstawie wzorów uzyskanych z rozwiązania zagadnienia brzegowego teorii sprężystości:

$$K_I = \frac{P}{W \cdot B} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F_I\left(\frac{a}{W}, \Theta\right) \quad (7.20)$$

$$K_{II} = \frac{P}{W \cdot B} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F_{II}\left(\frac{a}{W}, \Theta\right) \quad (7.21)$$

gdzie:

F_I, F_{II} – funkcje zależne od stosunku a/W oraz kąta Θ , których wartości można odczytać wykresów pokazanych na rys. 7.10.

Należy pamiętać, że zależności (7.20) i (7.21) słuszne są dla wartości a/W z przedziału $0.45 < a/W < 0.70$.

Przy wyznaczaniu współczynnika intensywności naprężeń dla próbek zwartych przy I sposobie obciążenia stosujemy następujące zależności:

$$K_{Ieo} = \frac{P}{W^{1/2} \cdot B} \cdot F_I\left(\frac{a}{W}\right) \quad (7.22)$$

gdzie:

$$F_I\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left(0.8072 + 8.58 \frac{a}{W} - 30.23 \frac{a^2}{W^2} + 41.088 \frac{a^3}{W^3} - 24.15 \frac{a^4}{W^4} + 4.951 \frac{a^5}{W^5}\right)$$

Należy pamiętać, że zależność (7.22) słuszna jest dla wartości stosunku a/W z przedziału $0.20 < a/W < 0.80$.

W dalszej kolejności na podstawie zmierzonej wartości D_{max} wyznaczamy doświadczalne wartości współczynników intensywności naprężeń zgodnie ze wzorami (7.14) i (7.15) lub wzorem (7.12) dla próbek zwartych przy I sposobie obciążenia.

Następnie dla obliczonych wartości doświadczalnych K_{dos} sprawdzamy warunek (7.19). W przypadku jego niespełnienia należy zwiększyć odległość ekranu od próbki z_0 oraz wielkość siły obciążającej P .

7.5. PRZEBIEG ĆWICZENIA

W celu wykonania ćwiczenia należy:

- 1° Zapoznać się ze schematem stanowiska.
- 2° Dokonać pomiaru rozmiarów próbek:
grubości próbek B , długości szczeliny a , szerokości próbek W .
- 3° Sprawdzić i przygotować elementy obciążające.
- 4° Wybrać odpowiednie zakresy pracy maszyny wytrzymałościowej (zakres przemieszczenia i obciążenia).
- 5° Ustawić w UTS program sterujący próbą.

- 6° Włączyć źródło światła zastosowane do oświetlenia próbki.
- 7° Sprawdzić równoległość wiązki oświetlającej próbkę.
- 8° Ustawić ekran w odległości (2–5) m od próbki oraz dokonać pomiaru z_0 .
- 9° Włączyć kamerę a w komputerze uruchomić program rejestrujący. Należy sprawdzić czy rejestrowany obraz widoczny jest na ekranie komputera.
- 10° Sprawdzić czy sygnałem sterującym jest siła, a następnie uruchomić maszynę wytrzymałościową. W przeciwnym razie przed ustawieniem próbki należy dokonać zmiany sygnału sterującego.
- 11° Zamocować próbkę w układzie obciążającym. Próbkę należy ustawić tak, aby wierzchołek szczeliny znajdował się w środku wiązki światła.
- 12° Wyregulować położenie trawersy maszyny tak, aby na próbkę nie działała siła obciążająca.
- 13° Sprawdzić prawidłowość ustawienia próbki w uchwycie (symetrię w stosunku do stempla obciążającego oraz prostopadłość osi wzdłużnej próbki w stosunku do osi wzdłużnej stempla).
- 14° Uruchomić program sterujący sterowniku UTS.
- 15° Zarejestrować obraz krzywej *caustics* w komputerze dla różnych wartości siły obciążającej i odległości ekranu od próbki z_0 .

Czynność 11° – 15° powtórzyć dla kolejnych wartości kąta θ .

Przy określaniu wpływu długości szczeliny początkowej na wartość K_I należy powtórzyć czynności 11° – 15° dla co najmniej 2 próbek o różnym stosunku a/W .

Po zakończeniu części doświadczalnej należy dokonać symulacji komputerowej wcześniej przeprowadzonych prób. W tym celu należy uruchomić program komputerowy „CAUSTICS.EXE” i wybrać z programu odpowiedni sposób obciążania próbki. Następnie dane z przeprowadzonych prób (a , W , B , z_0 , P) należy wprowadzić do programu, który dokonuje obliczeń wymiaru krzywej *caustics*, wartości współczynnika intensywności naprężeń K oraz pokazuje na ekranie monitora obraz krzywej *caustics*.

Czynności te należy powtórzyć dla każdej serii pomiarów w danej próbie i zanotować otrzymane wyniki.

7.6. SPRAWOZDANIE

Opracowanie wyników z przeprowadzonej próby polega na wyznaczeniu wartości współczynnika intensywności naprężeń K w zależności od sposobu obciążenia oraz dla różnych początkowych długości szczelin przy różnych poziomach obciążenia próbki.

Z przeprowadzonego ćwiczenia należy sporządzić sprawozdanie, które powinno zawierać:

- 1° Cele ćwiczenia.
- 2° Opis przebiegu przeprowadzonej próby.
- 3° Informacje dotyczące próbki i warunków badania takie, jak:
 - materiał próbki,
 - oznaczenie kształtu próbki, oznaczenie siły (rozciąganie T, zginanie B),
 - temp. w czasie badania i prędkość przemieszczenie stempla (mm/s),
 - geometria próbki (długość pęknięcia, grubość próbki, szerokość próbki),
 - umowna granica plastyczności.

Powyższe informacje powinny być zawarte w tabeli jak poniżej:

Materiał próbki				
Oznaczenie kształtu próbki				
Temperatura w czasie badania				
Numer próbki	σ_Y (MPa)	Rozmiary próbki		
		a (mm)	B (mm)	W (mm)
1.				
...				

- 4° Zmierzone wartości średnic D dla poszczególnych poziomów obciążenia i dla różnych geometrii należy zestawić w postaci poniższej tabeli:

lp	Siła	pomiar 1			pomiar 2			pomiar 3		
	P (N)	z_0 (m)	$D_{\max}$ (mm)	$D_{\min}$ (mm)	z_0 (m)	$D_{\max}$ (mm)	$D_{\min}$ (mm)	z_0 (m)	$D_{\max}$ (mm)	$D_{\min}$ (mm)
$\beta_1 =$										
...										

5° Dla zmiennego sposobu obciążenia odczytać z wykresu 7.6 wartość współczynnika μ^* a następnie współczynnika g .

6° Ze wzorów (7.14) i (7.15) wyznaczyć odpowiednio wartości K_I i K_{II} a otrzymane wyniki zestawić w tabeli:

β	lp	Siła	Wartości doświadczalne K (MPa m ^{1/2})						Wartości średnie		Wartości teoretyczne	
			pomiar 1		pomiar 2		pomiar 3					
		P	K _{I_{dos}}	K _{II_{dos}}	K _{I_{dos}}	K _{II_{dos}}	K _{I_{dos}}	K _{II_{dos}}	K _{I_{dos}}	K _{II_{dos}}	K _{I_{teo}}	K _{II_{teo}}
$\beta_i =$	1.											
	2.											
	3.											
...												

7° Dla próbki zwartej K_I wyznaczamy z zależności (5.12) a wyniki zestawiamy w postaci tabeli:

lp	Siła	Wartości doświadczalne K_I (MPa m ^{1/2})			Wartość średnia	Wartość teoretyczna
	P (N)	pomiar 1	pomiar 2	pomiar 3		
1.						
2.						
3.						

8° Sprawdzić warunek (7.19).

9° Podsumowanie i wnioski.

Literatura

1. MANOGG P.: Anwendung der Schattenoptik zur Untersuchung des Zerreißvorgangs von Platten. *Dissertation*. Freiburg, Germany (1964)
2. THEOCARIS P. S., JOAKIMIDES N.: Some properties of generalised epicycloids applied to fracture mechanics. *Journal of Appl. Mechanics*, tom 22 (1971) s. 876–890
3. THEOCARIS P. S.: Stress concentrations at concentrated loads. *Exp. Mechanics*, tom 13 (1973) s. 511–528
4. ROSAKIS A. J., FREUND L. B.: Optical measurement of the plastic strain concentration at crack tip in ductile plate. *Journ. Eng. Mater. Technology*, tom 104 (1982), s. 115–125
5. ROSAKIS A. J., MA C. C., FREUND L. B.: Analysis of the optical shadow spot method for a tensile crack in power-law hardening material. *J. Appl. Mech.*, tom 50 (1983) s. 777–782
6. KALTHOFF J. F., BEINERT J., WINKLER S.: Analysis of fast arresting cracks by the shadow-optical method of caustics. *IUTAM Symp. Optical Methods in Mechanics of Solids*, pod red. A. Lagarde, University of Poitiers, France, Sept. 10–14 1979, Sijthoff – Noordhoff, Alphen an den Rijn, The Netherlands (1980) s. 497–508, (1982) s. 115–125
7. KALTHOFF J. F.: Shadow Optical Method of Caustics, *Handbook on Experimental Mechanics*. pod red. A. S. Kobayashi, Prentice Hall, Englewood Cliffs N. Y. (1987), s. 430–450
8. LEVY N., MARCAL P. V and RICE J. R.: Progress in three-dimensional elastic-plastic stress analysis for fracture mechanics. *Nucl. Engineering Design*, tom. 17 (1971) s. 64–75
9. ROSAKIS A. J., RAVI-CHANDER K.: On crack tip stress state: an experimental evaluation of three-dimensional effects. *Int. J. Solids Structures*, tom 22 (1986), s. 121–134
10. GDOUTOS E. E., KONSTA-GDOUTOS M., MELETIS E. I.: The state of stress at a crack tip studied by caustics. *Proceedings of the VII International Congress on Experimental Mechanics*, Las Vegas (1992), The Society for Exp. Mech., s. 797–802