

DOPEŁNIENIE METODY MORY METODĄ WARSTWY OPTYCZNIE CZYNNEJ

ANIELA M. GLINICKA

Politechnika Warszawska

1. Wprowadzenie

O ile metoda mory i metoda elastooptyczna, każda z osobna, dostarczają w zakresie sprężystym pełnych informacji o stanie odkształcenia, to w zakresie sprężysto-plastycznym żadna z obu metod nie dostarcza kompletu informacji.

W celu otrzymania kompletnego rozwiązania dopełniono metodę mory metodą warstwy optycznie czynnej. Postępowanie takie pozwala na jednoczesne uzyskanie danych z obrazów przemieszczeń $u(x, y)$, $v(x, y)$ oraz obrazów izochrom $m(x, y)$ tego samego odkształcanego elementu konstrukcji.

Zaproponowaną metodę przedstawiono na przykładach rozciąganych osiowo pasm aluminiowych osłabionych korbami. Zależność naprężenie — odkształcenie dla aluminium charakteryzuje się wzmocnieniem powyżej umownej granicy plastyczności, a więc w strefie odkształceń sprężysto-plastycznych (nazywanej tu umownie strefą uplastycznioną).

Przedstawiono własny sposób badania elementów obiema metodami równocześnie. W wyniku końcowym — określono granice obszarów uplastycznionych i kierunki ich propagacji metodą warstwy optycznie czynnej oraz wyznaczono odkształcenia liniowe metodą mory. O wyborze równoczesnego zastosowania metod zdecydowały następujące czynniki:

- strefy uplastycznione na powierzchni elementu lokalizować można bezpośrednio,
- obliczenie odkształceń liniowych jest proste i dokładne.

2. Zalety i wady metod

Metoda mory przy zastosowaniu siatek liniowych najlepiej nadaje się do wyznaczania odkształceń liniowych. W wyniku posłużenia się metodą różnicową albo inaczej morą wstępną [11] możliwy jest pomiar w zakresie małych i dużych deformacji.

Nie wszystkie odpowiedzi dotyczące stanu odkształcenia można tą metodą uzyskać w sposób stosunkowo prosty i dokładny. Określenie granic stref uplastycznionych jest bardzo złożone i nieprecyzyjne. Nieprecyzyjne jest już określenie kątów odkształcenia postaciowego na granicy tych stref, ponieważ wymaga wyznaczenia pochodnych cząstko-

wych obu powierzchni przemieszczeń w kierunkach prostopadłych do kierunków głównych siatek wzorcowych [5] w tej samej chwili czasowej. Posługując się parą wzorcowych siatek liniowych, potrzebnych w metodzie różnicowej, obrazy przemieszczeń $u(x, y)$ i $v(x, y)$ rejestruje się przy danym obciążeniu kolejno, a więc w trakcie powiększania się stref uplastycznionych. Ponadto samo ustalenie już przybliżonych granic stref uplastycznionych jest bardzo złożone; trzeba wykonać szereg zdjęć, pomiarów i obliczeń oraz oddzielić część sprężystą od sprężysto-plastycznej (albo plastycznej).

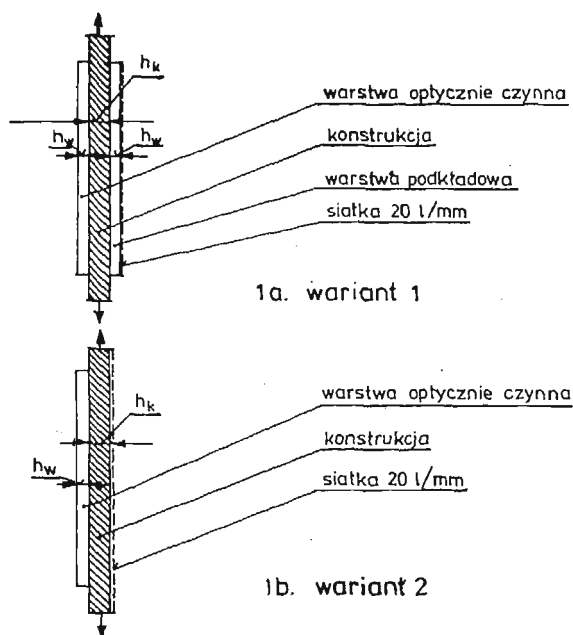
Całe postępowanie bardzo upraszcza się w wyniku dołączenia do metody mory metody warstwy optycznie czynnej, która na podstawie analogii fizycznej [12] umożliwia lokalizację stref uplastycznionych na bieżąco i pozwala wyznaczyć kierunki propagacji tych stref [8], [9]. Pomiarów elastooptycznych dokonuje się na podstawie obrazów w warstwie, a nie bezpośrednio na powierzchni elementu, co ma też pewne wady [12]. Wewnątrz obszarów uplastycznionych i w szczególności w pobliżu karbów, określenie odkształceń samej warstwy, która nie nadąża za odkształceniami elementu może być obciążone błędami. Niedogodność tę może uzupełnić pomiar za pomocą siatek stykowo umieszczonych na powierzchni elementu.

Połączenie dwu metod, umożliwiające wykorzystanie charakterystycznych i zarazem najprostszych danych doświadczalnych, celem otrzymania wyników ilościowych w zakresie sprężysto-plastycznym jest zatem zasadne.

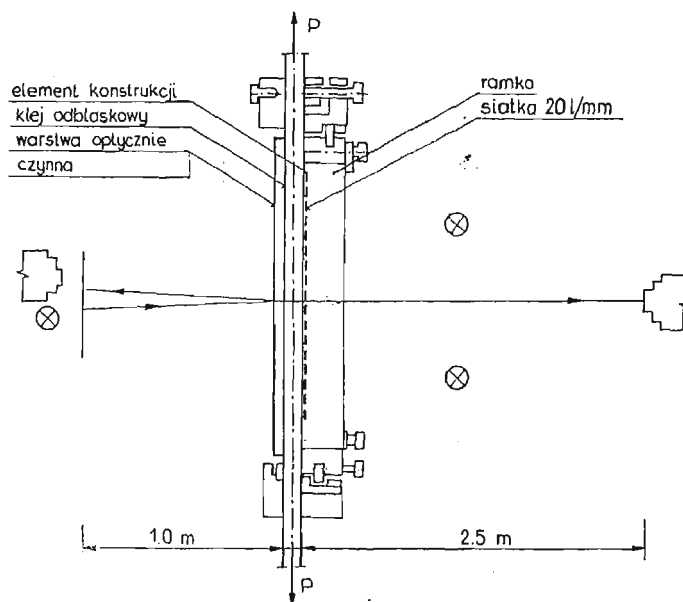
3. Metodyka badań

Do badań wybrano płaskie pasma aluminiowe o grubości 4 mm i szerokości 70 mm osłabione otworem kolistym o średnicy 12 mm albo trójkątnym karbem zewnętrznym o głębokości 12 mm. Elementy zostały przygotowane do badań dwuwariantowo rys. 1. Wariant 1 — to element z warstwą obustronną i siatką na warstwie nazywanej podkładową. Wariant 2 — to element z warstwą jednostronną i siatką na metalu. Warstwę optycznie czynną wykonano z Epidianu 5, warstwę podkładową z Epidianu 5 zmodyfikowanego poprzez dodanie do wnętrza płynnej żywicy drobnodispersyjnych wtrąceń tlenku aluminium [3]. Grubości warstw wynoszą 2 mm. Wariant 1 zapewnia co prawda symetrię pasma, ale izoluje siatkę od obiektu. Wady tej pozbawiony jest wariant 2 i on też został uznany za podstawowy. Warstwa optycznie czynna jest stosunkowo słabo odkształcalna (ulega pęknięciu przy $\varepsilon \approx 0,015$); badania metodą mory są jednak jeszcze w dalszym ciągu możliwe przy większych odkształceniach. Na obiekty naniesiono siatki kratowe o gęstości 20 linii/mm sposobem fotograficznym [7]. Posługiwano się metodą mory stykowej. Siatki wzorcowe umieszczano w specjalnej ramce zapewniającej dobry kontakt z siatką odkształcaną oraz wymagane ułożenia linii siatek. Siatka wzorcowa używana do otrzymywania obrazów przemieszczeń $u(x, y)$ była skrócona wstępnie, a siatka używana do otrzymywania obrazów przemieszczeń $v(x, y)$ wydłużona wstępnie, obie o kilka promil.

Badania elementów przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej ZD-10. Schemat układu pomiarowego pokazano na rysunku 2. Z jednej strony badanego elementu ustawiono polaryskop typu V z zamocowanym za płaszczyzną analizatora aparatem fotograficznym, a z drugiej strony aparat fotograficzny z teleobiektywem do fotografowania



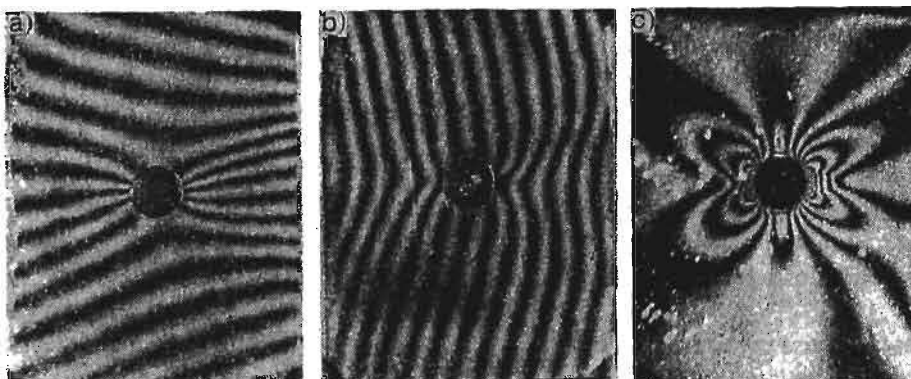
Rys. 1. Przekroje podłużne badanych elementów: 1a. wariant 1; 1b. wariant 2



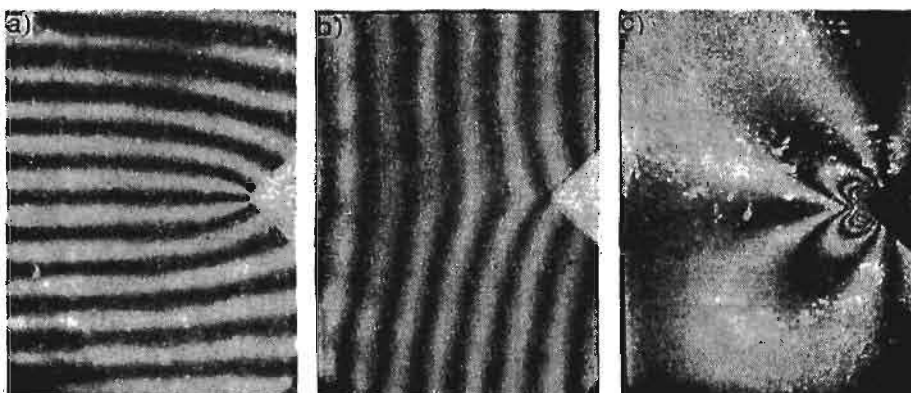
Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

prążków mory. Zdjęcia izochrom wykonywano przez filtr odpowiadający długości fali światła sodowego. Zdjęcia prążków mory wykonywano intensywnie oświetlając element białym światłem reflektorów.

Sposób przeprowadzenia badań nie wymaga stosowania specjalnych urządzeń optycznych [10], poza typowymi dla tego rodzaju metod doświadczalnych. Otrzymane w bada-



Rys. 3. Obrazy prążków mory i izochrom dla jednakowego obciążenia: a. mory $u(x, y)$; b. mory $v(x, y)$; c. izochromy całkowite



Rys. 4. Obrazy prążków mory i izochrom dla jednakowego obciążenia: a. mory $u(x, y)$; b. mory $v(x, y)$; c. izochromy całkowite

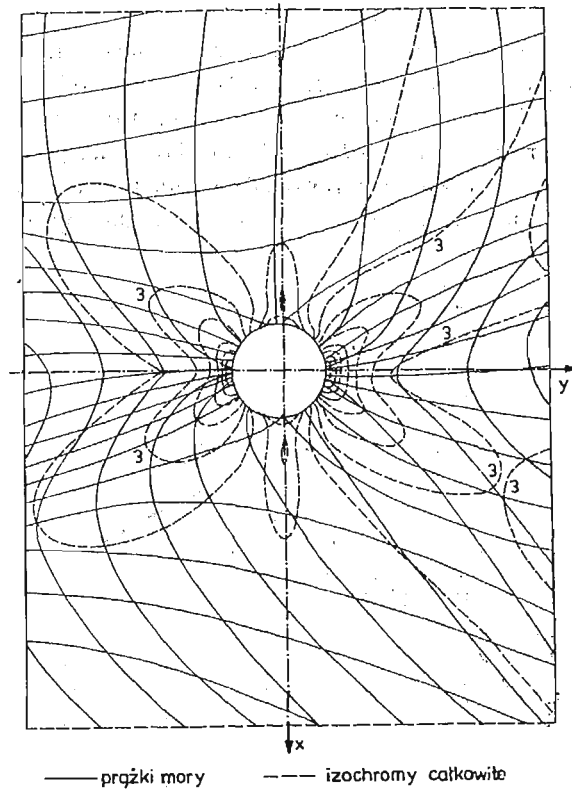
niach przykładowe zestawy obrazów prążków mory $u(x, y)$, $v(x, y)$ oraz izochrom całkowitych $m(x, y)$ dla jednakowego obciążenia elementów pokazano na rysunku 3a-3c i rysunku 4a-4c. Naprężenia średnie w najbardziej osłabionych przekrojach wynoszą: dla pasma z otworem kołowym — $\sigma_{sr} = 117$ MPa i dla pasma z zewnętrznym trójkątnym korbem — $\sigma_{sr} = 98$ MPa. Przedstawione fotografie pochodzą z badania elementów według wariantu 2. Charakter obrazów prążków obu rodzajów dla pasm rozciąganych o tym samym kształcie badanych według wariantu 1 jest taki sam.

4. Analiza wyników pomiarów

Analiza wyników badania elementów równocześnie obiema metodami obejmuje następujące zagadnienia:

1. porównanie nałożonych na siebie obrazów izochrom i przemieszczeń dla jednakowego obciążenia,
2. obliczenie odkształceń w przekrojach poprzecznych elementów i wyznaczenie punktów, w których kontur obszaru uplastycznionego przecina te przekroje,
3. wykorzystanie ustalonych kierunków propagacji stref uplastycznionych do obliczenia największych odkształceń metodą mory.

Wyniki badań przedstawiono dla wybranych przykładowo poziomów obciążenia.



Rys. 5. Łączny obraz przemieszczeń $u(x, y)$, $v(x, y)$ i izochrom $m(x, y)$ dla elementu według wariantu 2; $P = 28$ kN

Na rysunku 5 przedstawiono nałożone na siebie obrazy przemieszczeń $u(x, y)$, $v(x, y)$ i izochrom $m(x, y)$ otrzymane po obu stronach pasma z otworem według wariantu 2; (siła rozciągająca P równa się 28 kN, a σ_{sr} w najbardziej osłabionym przekroju wynosi 117 MPa).

Na obrazie elastoptycznym określa się izochromę — m_{gr} , która zgodnie z hipotezą

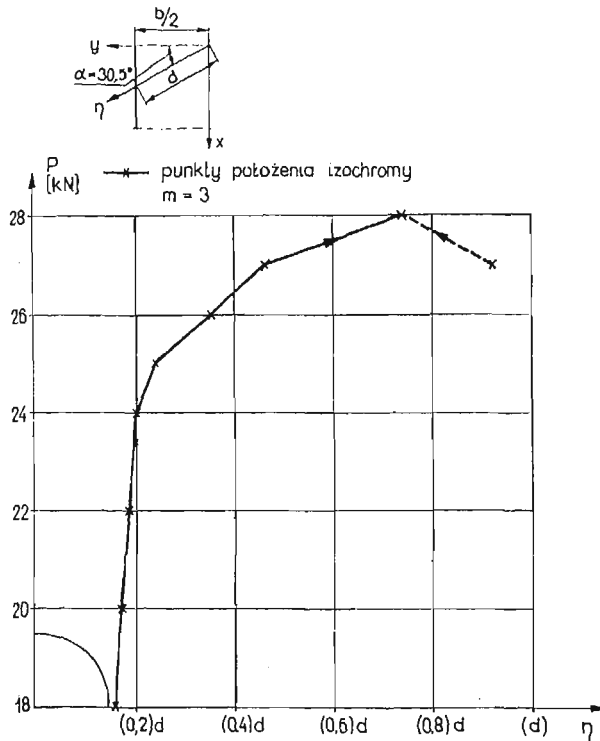
Coulomba-Treski stanowi tu granicę między obszarem sprężystym i sprężysto-plastycznym na podstawie zależności [12]:

$$m_{pr} = \frac{R_{pl}(1+\nu)C_n}{Ef} \quad (4.1)$$

gdzie: R_{pl} — granica plastyczności materiału konstrukcji; tu równa 108 MPa,
 ν, E — stałe sprężyste materiału konstrukcji; odpowiednio równe 0,336 i 71400 MPa,
 $1/C_n$ — współczynnik określający wpływ wzmocnienia elementu warstwą; dla wariantu 1 równy 1,2 oraz dla wariantu 2 równy 0,92 (por. [2]),
 f — elastooptyczna odkształceniowa stała modelowa; tu równa ok. $0,6 \times 10^{-3}$ [1/l rz.iz].

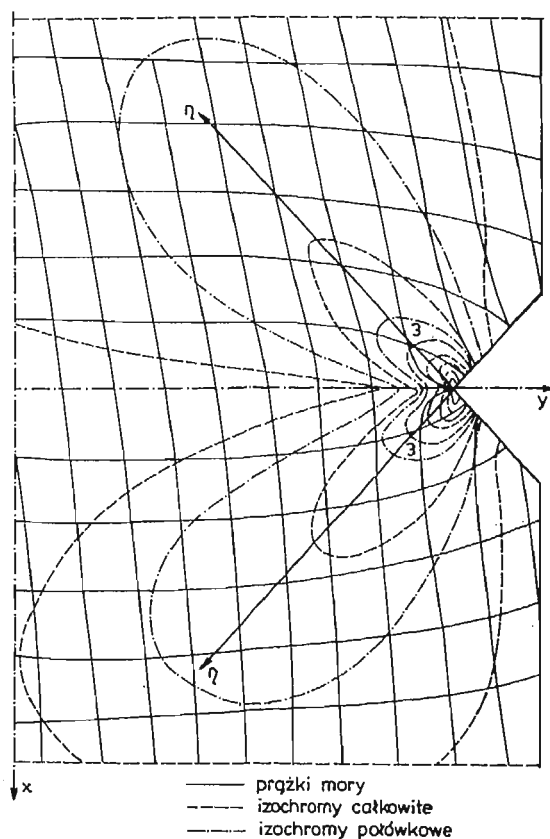
Na rysunku 5 zaznaczono izochromę rzędu 3 sąsiadującą z izochromą graniczną przyjmującą wartość 2,8. W miejscach największych odkształceń, zwłaszcza jest to widoczne w pobliżu karbu, prążki mory zagęszczają się.

Zaletę dopełnienia metody mory — metodą warstwy optycznie czynnej łatwo potwierdzić obserwując propagację lokalnych stref uplastycznionych od prostoliniowej krawędzi ku otworowi w środku. Z obrazów przemieszczeń istnienia tych stref w fazie ich powstawania i początkowego rozwoju nie można wykazać, bo obraz prążków jest zbyt rzadki. Wzdłuż określonego metodą warstwy optycznie czynnej kierunku η (por. także [8]), rys. 6 — dla wariantu 2, następuje połączenie izochrom granicznych wędrujących z dwóch



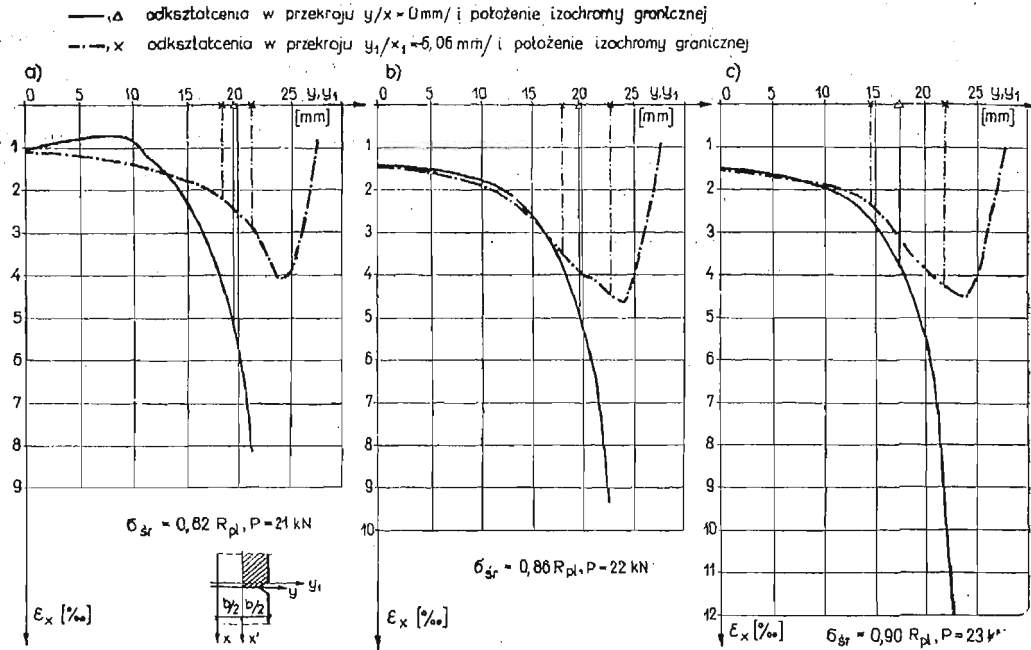
Rys. 6. Wędrowka izochromy granicznej wzdłuż kierunku propagacji η

stron. Kierunki propagacji η w elementach wariantu 1 i 2 prawie pokrywają się. Pomierzono kąty (rys. 6) między osiami η i y w obu wariantach. Wartości ich są bardzo bliskie sobie i wynoszą średnio 30° . Występujące w elemencie wariantu 2 zginanie praktycznie prawie nie zmienia kierunków propagacji stref uplastycznionych. Analogicznie jest w elementach z zewnętrznym trójkątnym karbem o kącie rozwarcia 90° , w których obraz izochrom dla wariantów 1 i 2 wskazuje kierunek najintensywniejszej propagacji η wzdłuż prostej pokrywającej się z przedłużeniem linii krawędziowej karbu; przykładowy rysunek 7 dla wariantu 2 (siła rozciągająca pasmo równa się 23 kN, a σ_{sp} w najbardziej osłabionym przekroju wynosi 98 MPa). Uplastycznienie elementu następuje tutaj przy karbie.

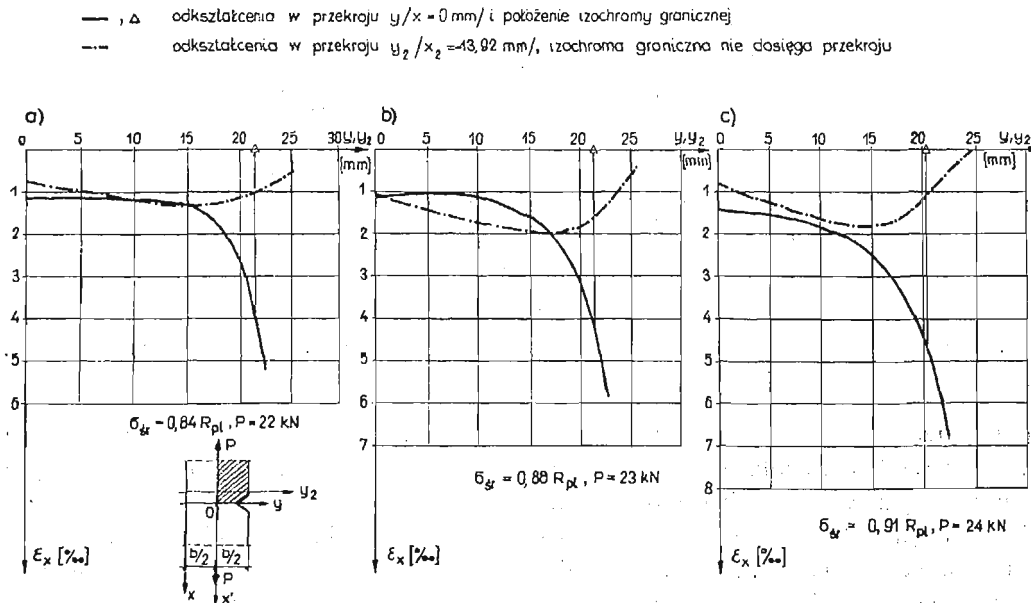


Rys. 7. Łączny obraz przemieszczeń $u(x, y)$, $v(x, y)$ i izochrom $m(x, y)$ dla elementu według wariantu 2; $P = 23$ kN

Dla trzech kolejnych poziomów obciążenia elementu-wariant 2 — wyznaczono metodą mory odkształcenia podłużne ε_x w przekrojach y i y_1 oraz zaznaczono punkty, w których izochroma graniczna przecina te przekroje, rys. 8. W miarę oddalania się izochromy granicznej (rzędu 2,8) od dna karbu odpowiadające jej położeniu wartości odkształceń podłużnych na osi y maleją. Jednocześnie odcinek między izochromą graniczną przecinającą oś y_1 gdzie nastąpiło całkowite uplastycznienie zbliża się coraz bardziej do lokalnego ekstremum odkształceń ε_x . Obserwowany efekt jest lokalny i świadczy o tym, że odkształ-



Rys. 8. Odkształcenia w przekrojach y i y_1 elementu według wariantu 2 (dla zakreskowanej części pasma)



Rys. 9. Odkształcenia w przekrojach y i y_2 elementu według wariantu 1 (dla zakreskowanej części pasma)

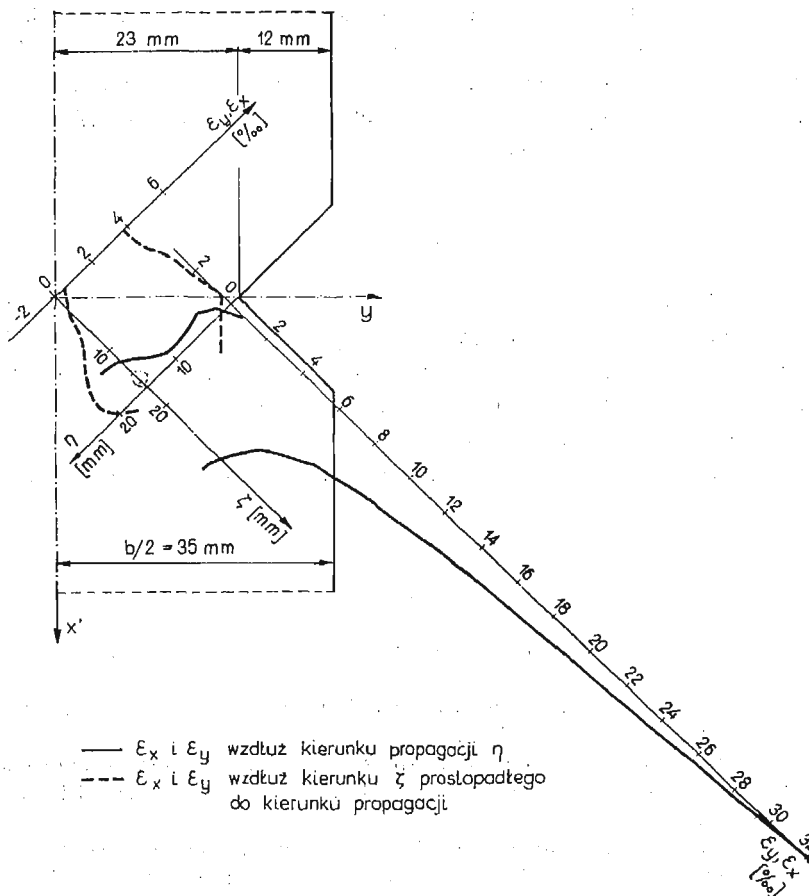
cenia warstwy w pobliżu karbu nie nadążają za odkształceniami powierzchni metalu (por. także [12]). Przy silniejszym rozwoju stref uplastycznionych, a więc przy większym oddaleniu się izochromy granicznej od karbu, efekt ten zmniejsza się do zaniknięcia. Odkształcenia liniowe wyznaczono tu z zależności [1], [11]:

$$\varepsilon_x = \partial u / \partial x, \quad (4.2)$$

która prowadzi do rezultatów pokrywających się z zależnością [1], [11]:

$$\varepsilon_x^L = \sqrt{1 + 2(\partial u / \partial x) + (\partial u / \partial x)^2 + (\partial v / \partial x)^2} - 1 \quad (4.3)$$

w przypadku małych odkształceń i małych wzajemnych obrotów siatek oraz jest dostatecznie dokładna dla większych odkształceń i większych kątów obrotu siatek. Obliczenia przeprowadzono według programu przygotowanego na maszynę cyfrową „Odra 1305” w języku Fortran [2]. Jako dane podstawowe wprowadzano punkty położenia środków prążków mory i izochrom w przekrojach poprzecznych elementów ustalone na zdjęciach negatywowych [2], [5].



Rys. 10. Odkształcenia wzdłuż kierunku η i ζ po pęknięciu warstwy optycznie czynnej; $P = 26$ kN

Takie samo rozwiązanie przedstawiono dla elementu badanego według wariantu 1 (rys. 9). Wykresy odkształceń podłużnych ε_x w przekrojach y i y_2 sporządzono na podstawie obrazów prążków mory otrzymanych na warstwie podkładowej z siatką. Odkształcenia są tu odpowiednio mniejsze niż w wypadku wariantu 2, bo element jest silniej wzmocniony przez istnienie dwóch warstw. Rząd izochromy granicznej wynosi 3,2 — czyli rozwój stref uplastycznionych jest nieco słabiej symulowany niż w elemencie z jedną warstwą, gdzie izochroma graniczna rzędu 2,8 wchodzi bardziej w głąb badanego pola. Wpływ wzmocnienia elementów warstwami, zależny od rodzaju materiałów, z których je wykonano i od ich grubości, przedstawiono w pracy [6].

Element według wariantu 1 po całkowitym pęknięciu warstw nie nadaje się do badań, w przeciwieństwie do elementu według wariantu 2, w którym dalej wyniki ilościowe można otrzymywać z obrazów prążków mory na powierzchni metalu. Na przykładowo wykonanym rysunku 10 — wzdłuż kierunku propagacji η wyznaczonym przed pęknięciem warstwy optycznie czynnej, obliczono po jej pęknięciu odkształcenia liniowe metodą mory (por. także [4]). Wzdłuż osi η odkształcenia rosną w miarę zbliżania się do dna karbu. Wzdłuż osi ζ prostopadłej do η , tworzą się kolalne ekstrema odkształceń, które są nieco odchylone od przecięcia osi η i ζ . Małe przesunięcia ekstremów krzywych ε_x i ε_y świadczą o nieco zmienionym wpływie całkowicie pękniętej warstwy na odkształcenia powierzchni elementu. Odkształcenie ε_x przy karbie osiąga tu wartość największą dla danego materiału konstrukcji; obciążenie zrywające element jest już niewiele większe od tu podanego. Wykonana próba może posłużyć do oceny nośności elementu.

5. Podsumowanie

Wyniki doświadczeń, w postaci bezpośrednich i prostych rozwiązań, potwierdzają celowość dopełnienia metody mory metodą warstwy optycznie czynnej. Znacznie rozszerzone są możliwości badawcze w stosunku do każdej z tych metod stosowanych niezależnie. Jednoczesne wykorzystanie metod może być bardzo przydatne, zwłaszcza w bardziej szczegółowych badaniach elementów konstrukcji.

Praca została wykonana w ramach problemu węzłowego 05.12 koordynowanego przez IPPT PAN.

Literatura

1. A. J., DURELLI, V. J. PARKS, *Moiré analysis of strain*, Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, New Jersey 1970.
2. A. GLINICKA, *Możliwości łącznego zastosowania metody mory i metody elastooptycznej*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawaska, 1983.
3. A. GLINICKA, *Przykład zastosowania rastrów na podkładzie z materiału elastooptycznego do badania płaskich stanów naprężenia*, X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Referaty, Warszawa 1982.
4. A. GLINICKA, *Wyznaczanie odkształceń wzdłuż kierunków propagacji obszarów plastycznych metodą mory*. XI Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Referaty, Warszawa 1984.
5. A. GLINICKA, *Analiza możliwości łącznego zastosowania metody mory i metody elastooptycznej*, Archiwum Inżynierii Lądowej (w druku).

6. A. GLINICKA, P. JASTRZĘBSKI, *Wpływ wzmocnienia warstwą elastoptyczną na odkształcenia wyznaczone metodą mory*, XII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Referaty, Warszawa 1986.
7. P. JASTRZĘBSKI, J. KAPKOWSKI, S. WICHNIEWICZ, J. WĄSOWSKI, K. PATORSKI, *Zastosowanie metody mory do badania elementów konstrukcji*, Wyd. Komitetu Mechaniki PAN, Warszawa-Jabłonna 1981.
8. J. KAPKOWSKI, *Propagacja obszarów plastycznych w warunkach płaskiego stanu naprężeń*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika z. 50/1978.
9. J. KAPKOWSKI, *Studium propagacji obszarów plastycznych w zginanych elementach z karbem*, Archiwum Budowy Maszyn, tom XXX, zeszyt 1 - 2, 1983.
10. H. SHIMADA, M. OBATA, *Moiré method combined with photoelastic coating method*, Technology Reports, Tohoku Univ., Vol. 43, No 1, 1978.
11. W. SZCZEPIŃSKI, redaktor pracy zbiorowej, *Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego*, PWN Warszawa 1984.
12. F. ZANDMAN, S. REDNER, J. W. DALLY, *Photoelastic coatings*, IOWA STATE/SESA, 1977.

Резюме

ПОПОЛНЕНИЕ МЕТОДА МУАРА МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Метод муара и метод оптически чувствительных покрытий дают полный состав информации о состоянии упруго-пластических деформаций элементов конструкций.

Произведено исследование растягиваемых алюминиевых полос с концентраторами напряжений. На одной стороне полосы наклеено оптически чувствительное покрытие из эпоксидной смолы, а на вторую нанесено сетку взаимно перпендикулярных линий с частотой 20 л/мм. Снимались картины изохром и муара при одинаковой нагрузке элемента. В конечном итоге линейные деформации элементов определено при помощи метода муара. На основе полученных, методом оптически чувствительных покрытий, предельных изохром отделено эластический спектр деформаций от спектра упруго-пластического.

В предложенном способе использовано характеристические и одновременно более простые экспериментальные данные полученные применяя каждый из методов.

Summary

THE COMPLEMENT OF MOIRÉ METHOD BY PHOTOELASTIC COATING METHOD

The moiré method and photoelastic coating method applied simultaneously provide full information on the strain state of elasto-plastic structural elements.

The tensile tests were performed on aluminium strips. A photoelastic coating was glued to one side of the strip while the other side of the strip was covered by a cross grating of 20 l/mm. The isochromatics and moiré patterns were photographed at the same level of loading. As a result the linear strains were determined using the moiré method. On the basis of boundary isochromatics, obtained using the photoelastic coating method, the range of elastic strains was separated from the elastic-plastic range.

In the presented procedure both the characteristic and most simplest external data provided by each method were used.

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 23 września 1985 roku.