

ELASTOOPTYCZNE BADANIE NAPRĘŻEŃ CIEPLNYCH W ŚRODNIKU DŹWIGARA DWUTEOWEGO

GRZEGORZ GALIN

ZBIGNIEW ORŁÓŚ

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

1. Cel i metody badań

Problem wyznaczania naprężeń termosprężystych ma ważne znaczenie w ocenie wytrzymałości elementów konstrukcyjnych różnych obiektów technicznych. Przykładowo można tu wymienić podlegające obciążeniom cieplnym maszyny i urządzenia energetyczne (kotły, turbiny parowe i gazowe, elementy siłowni jądrowych), pojazdy mechaniczne, statki powietrzne i kosmiczne, urządzenia hutnicze, elementy poddane procesom obróbki cieplnej.

Tematem pracy jest zagadnienie wpływu otworu kołowego w środku dźwigara dwuteowego na stan naprężeń termosprężystych powstających w wyniku nagłego obciążenia cieplnego pólki. Zagadnienie to jest częścią szerszej zakrojonych badań dotyczących wpływu otworów o różnych średnicach d przy określonej stałej wartości H wysokości dźwigara. Rozpatrywany w pracy otwór można umownie zaliczyć do grupy otworów o średniej wielkości w porównaniu z wysokością przekroju, tj. mieszczących się w granicach stosunków $\frac{d}{H}$ od 0.2 do 0.3.

W przedstawionych w niniejszym artykule badaniach zastosowano rozwijaną w pracach własnych metodę termoelastoptycznej analizy efektów dwójłomności wymuszonej w modelach wykonanych z optycznie czułych materiałów.

Ze względu na niestacjonarny charakter rozpatrywanych zjawisk fizycznych w badaniach stosowano telewizyjną i fotograficzną rejestrację izochrom, automatyczne pomiary temperatury oraz pomiary odkształceń metodą tensometrii elektrozestancyjnej w wybranych punktach modelu.

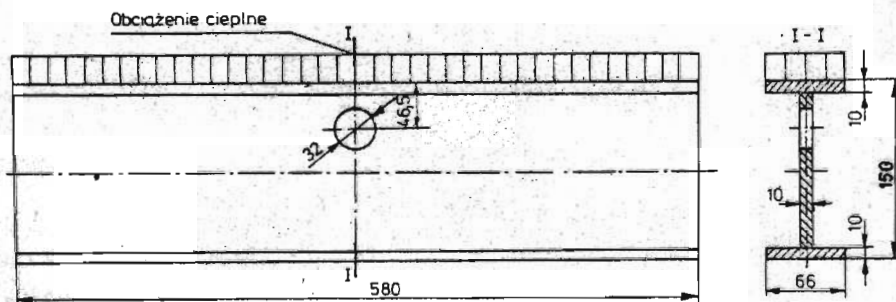
W badaniach dążono do określenia charakteru spiętrzenia naprężeń termosprężystych w otoczeniu otworu, zasięgu spiętrzenia oraz ilościowej oceny tego zjawiska.

2. Model

Przedmiotem badań termoelastoptycznych był model dwuteownika z otworem w środku, wykonany metodą sklejania płyt z kompozycji epoksydowej typu Araldit B. W ramach wstępnych badań określono własności mechaniczne, optyczne i cieplne materiału modelowego.

Model posiadał otwór o średnicy $d = 32\text{mm}$, znajdujący się w środku w pobliżu obciążonej cieplnie półki.

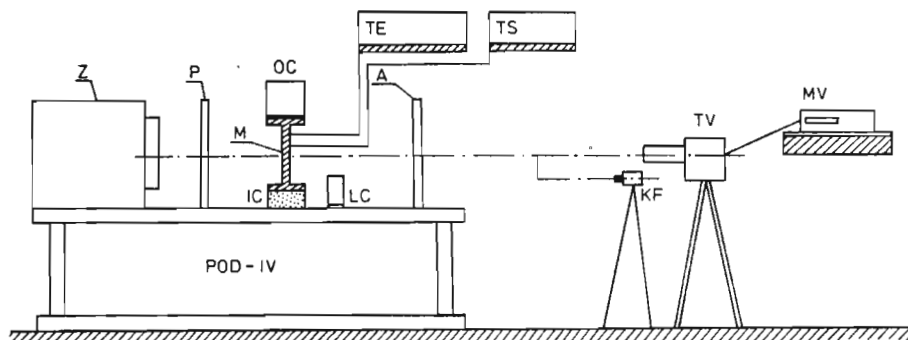
Na rys.1 przedstawiono schemat modelu wraz z rozmiarami gabarytowymi.



Rys. 1.

3. Stanowisko pomiarowe

W skład zastosowanego w badaniu stanowiska pomiarowego wchodziły pokazane schematycznie na rys.2 elementy i zespoły urządzeń pomiarowych i rejestracyjnych. Podstawowym urządzeniem pomiarowym był polaryskop elastoptyczny POD IV. Źródło światła (Z) tego polaryskopu jest wyposażone w lampy jarzeniowe umożliwiające uzyskanie światła białego oraz lampy sodowe dające światło monochromatyczne o długości fali $\lambda_{sr} = 589.3\text{mm}$. Średnica zespołów filtrów polaryzatora (P) i analizatora (A) wynosiła 500 mm, co umożliwiało bardzo dobrą obserwację dużej części środka modelu (M), którego jedna półka (dolna) była izolowana cieplnie (IC), a druga (górną) podlegała obciążeniu cieplnemu przy użyciu specjalnego pojemnika (OC) zawierającego rozdrobniony suchy lód. Do pomiarów temperatury w poszczególnych punktach modelu za pomocą miniaturowych termoelementów służył elektroniczny zestaw (TE) wraz z urządzeniem do automatycznego wydruku wyników. Rejestrację zmiennych w czasie efektów interferencyjnych prowadzono przy użyciu kamery telewizyjnej Sony (TV) i magneto-



Rys. 2. *Z* - źródło światła, *P* - polaryzator, *A* - analizator, *M* - model, *OC* - obciążenie cieplne, *IC* - izolacja cieplna, *TE* - elektroniczny zestaw do punktowych pomiarów temperatury, *TV* - kamera telewizyjna, *MV* - magnetowid, *LC* - licznik czasu (zegar cyfrowy), *KF* - kamera fotograficzna, *TS* - elektroniczny zestaw do pomiaru odkształceń

widu Panasonic (*MV*). Do uzyskania pojedynczych zdjęć wymienionych efektów stosowano kamerę fotograficzną (*KF*).

Stanowisko pomiarowe było wyposażone w elektroniczny licznik czasu (*LC*), co pozwalało na zarejestrowanie, na tle każdego zdjęcia, efektów interferencyjnych w odpowiednim czasie od początku obciążenia cieplnego modelu.

4. Przebieg badań

Po umieszczeniu modelu w przestrzeni pomiarowej polaryskopu elastoptycznego czekano przez dostatecznie długi okres czasu, na wyrównanie temperatury modelu z utrzymywaną na stałym poziomie temperaturą otoczenia. Następnie dokonywano rejestracji wskazań zastosowanych w badaniach przyrządów pomiarowych oraz rejestracji obrazu wstępnych efektów optycznych w modelu, bezpośrednio przed jego obciążeniem cieplnym.

Od początku obciążenia cieplnego rozpoczynano automatyczną rejestrację wartości temperatur, odkształceń oraz układów izochrom przy ciemnym polu widzenia polaryskopu i zastosowaniu kołowo spolaryzowanego światła monochromatycznego sodowego względnie białego. Pozwoliło to w pełni wykorzystać zarejestrowane telewizyjnie efekty optyczne do określenia przebiegu niestacjonarnych układów izochrom. W szczególności ułatwiło to wyznaczenie izochromy zerowego rzędu oraz kierunku wzrostu wartości rzędów izochrom, co ma podstawowe znaczenie dla poprawnej interpretacji analizowanych efektów optycznych.

5. Wyniki badań

5.1. Układy izochrom

Zarejestrowane fotograficznie i telewizyjnie układy niestacjonarnych izochrom charakteryzują stan naprężenia badanego modelu dwuteownika. W szczególności interesująca jest analiza układów w następujących obszarach modelu:

- bezpośrednie otoczenie otworu w środku,
- rozkład izochrom wzdłuż brzegu otworu,
- rozkład izochrom w poprzecznym przekroju modelu przechodzącym przez oś symetrii otworu,
- rozkład izochrom w przekroju położonym poza obszarem zakłócenia obrazu izochrom wywołanego obecnością otworu.

Na rys.3 i 4¹ przedstawiono układy izochrom zarejestrowane po 30, 60, 120, 240, 600 i 1200s od chwili przyłożenia obciążenia cieplnego modelu. Z przebiegu izochrom widać wyraźnie spiętrzenie naprężeń wywołane otworem. Spiętrzenie to ma charakter lokalny i zanika w przekrojach poprzecznych modelu w pewnej odległości od brzegu otworu. Orientacyjnie odległość ta jest równa około 4 średnicom otworu. Dla przedstawienia zaburzenia układów izochrom spowodowanych wpływem końcowego swobodnego przekroju modelu na rys.3 i 4 celowo podano zdjęcia izochrom w środku w obszarze między końcem belki a otworem.

5.2. Rozkład izochrom wzdłuż brzegu otworu

Wyznaczone wartości rzędów izochrom wzdłuż brzegu otworu mają podobny charakter. Na brzegu występują cztery punkty zerowe (izotropowe) co świadczy o zmianie znaku naprężenia brzegowego.

Na rys. 5÷7 przedstawiono przykładowo rozkłady izochrom określających naprężenia wzdłuż brzegu otworu modelu odpowiadające czasom rejestracji 120, 240, 360, 600, 1200 i 2400s od początku obciążenia cieplnego. Na wykresach oznaczono znakiem "+" naprężenia rozciągające, znakiem "-" naprężenia ściskające.

Największe co do bezwzględnej wartości naprężenia występują na brzegu otworu w punktach *C* (rys.8) w sąsiedztwie obciążonej cieplnie półki modelu. Przekraczają one wartości bezwzględne naprężeń przeciwnego znaku występujące w punktach *A* i *B*.

Mimo pewnej niezbyt znacznej asymetrii rozkładu naprężeń brzegowych (różnice wartości naprężeń w punktach *C* i *D*) rozkład ten jest podobny do rozkładu naprężeń brzegowych w przypadku otworu w osiowo rozciągającym

¹Rysunki na końcu pracy

plaskownik. Świadczy to o tym, że w obszarach położonych z dala od otworu dominuje stan naprężenia o charakterze jednoosiowym.

Przedstawione na rys.9 wykresy zmian rzędów m izochrom w punktach A, B, C i D brzegu otworu w zależności od czasu trwania obciążenia wskazują, że maksymalna wartość rzędu izochromy występuje w punkcie C po ok. 600s czasu trwania obciążenia cieplnego półki modelu. W pozostałych punktach (D, A, B) rzędy izochrom osiągają ekstremalne wartości w okresie późniejszym.

Na rys.10 ÷ 12 przedstawiono dla przekrojów przechodzących przez oś symetrii otworu rozkłady rzędów izochrom w różnych czasach trwania obciążenia cieplnego.

Na rys.13 podano przykładowo dla czasu $t = 240s$ porównanie rozkładów izochrom w poprzecznym przekroju I - I przechodzącym przez oś symetrii otworu i przekroju II - II znajdującego się w strefie poza zasięgiem wpływu otworu. Odległość między wymienionymi przekrojami wynosiła 110mm.

Rozkład izochrom w przekroju II - II wskazuje na pewnym odcinku przekroju wystąpienie rozkładu naprężeń zbliżonego do liniowej zależności jaka charakteryzuje łączne zginanie i ściskanie.

5.3. Ocena spiętrzenia naprężeń

W ocenie wpływu otworu na spiętrzenie naprężeń wykorzystano wyniki niezależnie przeprowadzonych badań modelu dwuteownika o ciągłym środniku (bez otworu).

Na rys.14 przedstawiono przykładowo rozkład izochrom w wymienionym modelu dla czasu $t = 180s$, a na rys.15 podano wykresy rozkładów izochrom w przekroju środkowym modelu o środniku ciągłym dla kilku czasów od początku obciążenia cieplnego.

W celu scharakteryzowania zmienności rzędów izochrom w punktach C i D brzegu otworu (rys.8) można umownie określić parametry bezwymiarowe α_{mC} i α_{mD} w postaci:

$$\alpha_{mC} = \frac{m_C}{m_{C'}}, \quad \alpha_{mD} = \frac{m_D}{m_{D'}}$$

gdzie: m_C i $m_{C'}$, m_D i $m_{D'}$ oznaczają wartości rzędów izochrom w odpowiadających sobie punktach, $C - C'$ i $D - D'$ modelu bez otworu i modelu z otworem.

Wartości α_{mC} i α_{mD} określone na podstawie badań przedstawiono w tabl.1 oraz na rys.16 i 17.

Z tablicy 1 widać, że współczynniki te zmieniają się w zależności od czasu trwania obciążenia cieplnego. W rozpatrywanym przypadku największej wartości m_C równej 14.5 j.rz.iz. odpowiada współczynnik α_{mC} równy 2.84.

W przeprowadzonych badaniach doświadczalnych i obliczeniach numerycznych stwierdzono, że w punktach C' i D' położonych na pionowej osi symetrii modelu bez

Tablica 1. Wartości współczynników α_{mC} i α_{mD}

Lp	Czas s	m_C	$m_{C'}$	α_{mC}	m_D	$m_{D'}$	α_{mD}
		j.rz.iz.	j.rz.iz.		j.rz.iz.	j.rz.iz.	
1	120	8.5	3.15	2.70	6.5	2.1	3.10
2	360	12.9	4.6	2.80	9.4	3.1	3.03
3	600	14.5	5.1	2.84	10.4	3.6	2.89
4	1200	13.5	4.5	3.00	11.3	3.9	2.90
5	2400	12.8	3.71	3.45	11.6	3.8	3.05

otworu w środku występują, przy danym sposobie obciążenia cieplnego, jednoosiowe stany naprężenia. Oznaczając przez $\sigma_{C'}$ i $\sigma_{D'}$ wartości naprężeń w punktach C' i D' można określić współczynniki $\alpha_{\sigma C}$ i $\alpha_{\sigma D}$ w postaci:

$$\alpha_{\sigma C} = \frac{\sigma_C}{\sigma_{C'}} = \frac{K_{\sigma m T}}{K_{\sigma m T'}} \alpha_{m C},$$

$$\alpha_{\sigma D} = \frac{\sigma_D}{\sigma_{D'}} = \frac{K_{\sigma m T}}{K_{\sigma m T'}} \alpha_{m D},$$

gdzie:

σ_C i σ_D - naprężenie w punktach C i D modelu z otworem,

$K_{\sigma m T}$ i $K_{\sigma m T'}$ - elastoptyczne naprężeniowe stałe modelowe odpowiednio w temperaturach T i T' .

W przypadku $K_{\sigma m T} = K_{\sigma m T'}$ co zachodzi gdy $T = T'$ lub $K_{\sigma m T} := K_{\sigma m T'} = \text{const}$ otrzymujemy wprost:

$$\alpha_{\sigma C} = \alpha_{m C} \quad \text{względnie} \quad \alpha_{\sigma D} = \alpha_{m D}.$$

W innym przypadku należy pamiętać o tym, że wartości współczynników α_{σ} i α_m mogą się różnić mniej lub więcej w zależności od różnicy temperatur oraz charakteru zmienności elastoptycznej naprężeniowej stałej modelowej jako funkcji temperatury.

Współczynniki α_{mC} i α_{mD} określają z dobrym przybliżeniem wpływ otworu na spiętrzenie naprężeń termosprężystych przy założeniu, że różnice temperatur w odpowiadających sobie punktach $C - C'$, $D - D'$ są małe.

Należy zauważyć, że uzyskane wyniki są ważne dla przyjętych proporcji geometrycznych modelu fizycznego, oraz sposobu obciążenia cieplnego i czasu jego trwania określonych odpowiednio liczbami Biota (Bi) i Fouriera (Fo):

$$Bi = \frac{\alpha H}{\lambda}, \quad Fo = \frac{at}{H^2},$$

gdzie:

α – współczynnik przejmowania ciepła,

λ – przewodność cieplna,

a – współczynnik wyrównywania temperatury,

t – czas,

H – wysokość przekroju.

W rozpatrywanym przez nas przypadku liczba Biota była równa $Bi=262.5$ a pomiary wykonywano w przedziale czasu określonego liczbą Fo od 0.001 do 0.017.

W wyniku badań uzyskano następujące informacje o spiętrzeniu naprężeń spowodowanym otworem w środku dźwigara dwuteowego.

1. W bezpośrednim sąsiedztwie otworu występuje znaczne spiętrzenie naprężeń na jego brzegu w punkcie C w pobliżu półki podlegającej obciążeniu cieplnemu.
2. Wywołane otworem zaburzenie pola naprężeń w środku dźwigara ma charakter lokalny i zanika poza obszarem sąsiadującym z otworem.
3. Maksymalne naprężenia na brzegu otworu występują w punkcie C położonym w pobliżu półki.
4. W punkcie D położonym na brzegu otworu od strony osi dźwigara występują naprężenia o wartościach nie przekraczających wartości naprężeń w punkcie C .
5. W punktach A i B brzegu otworu występują naprężenia ekstremalne o bezwzględnych wartościach mniejszych od bezwzględnych wartości naprężeń w punktach C i D , lecz o znakach przeciwnych.
6. Od czasu rozpoczęcia obciążenia cieplnego wartości naprężeń na brzegu otworu zrazu rosną, a następnie po osiągnięciu maksymalnych wartości bezwzględnych maleją.

Należy ponadto zauważyć, że przy określaniu współczynników $\alpha_{\sigma C}$ i $\alpha_{\sigma D}$ za stan naprężenia odniesienia przyjmuje się stan naprężenia w modelu bez otworu (karbu), obciążonym cieplnie na brzegu identycznie jak model z otworem. Odpowiednio do przyjętego warunku wymiany ciepła na brzegu można uzyskać wartość współczynnika spiętrzenia naprężeń, która określa maksymalne naprężenie na brzegu otworu. Należy również pamiętać o tym, że współczynniki $\alpha_{\sigma C}$ i $\alpha_{\sigma D}$ są określone w odniesieniu do różnych punktów i różnych zmiennych w czasie naprężeń w modelu nieosłabionym.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania elastoptyczne wykazały, że celowe jest zastosowanie rejestracji efektów optycznych za pomocą kamery telewizyjnej i magnetowidu. Wynika to w szczególności z:

- prostoty rejestracji obrazu z możliwością bezpośredniego wielokrotnego odtwarzania przebiegu rozpatrywanego zjawiska niestacjonarnej dwójłomności wymuszonej,
- możliwości wielokrotnej obserwacji niestacjonarnych wielobarwnych i monochromatycznych układów izochrom,
- łatwego określenia położenia punktów izotropowych i wyznaczenia izochromy zerowego rzędu przy wykorzystaniu światła białego,
- szybkiego wyznaczenia kierunku wzrostu wartości rzędu izochromy na podstawie obserwacji kolejności zmian barw poszczególnych prążków zarejestrowanych w świetle białym,
- możliwości szybkiej przybliżonej oceny ułamkowych rzędów izochrom odpowiadających izochromom o różnych barwach.

Uzyskane szczegółowe wyniki badań dają podstawę do pozytywnej oceny przydatności zastosowanej metody rejestracji izochrom w zagadnieniach doświadczalnej analizy spiętrzenia niestacjonarnych naprężeń termosprężystych.

Literatura

1. Praca zbiorowa pod redakcją Orłosa Z., *Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń*, PWN, 1977
2. CUDNY W., DYLAĞ Z., GALIN G., ORŁOŚ Z., *Analiza efektów cieplnych, mechanicznych i optycznych w pewnym przypadku badań termosprężystych*, Materiały XI Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 6-8 września 1984
3. DYLAĞ Z., ORŁOŚ Z., *Doświadczalna analiza naprężeń termosprężystych metodą elastoptyczną*, *Mechanika Teoretyczna i Stosowana* 2-3, 21, 1983

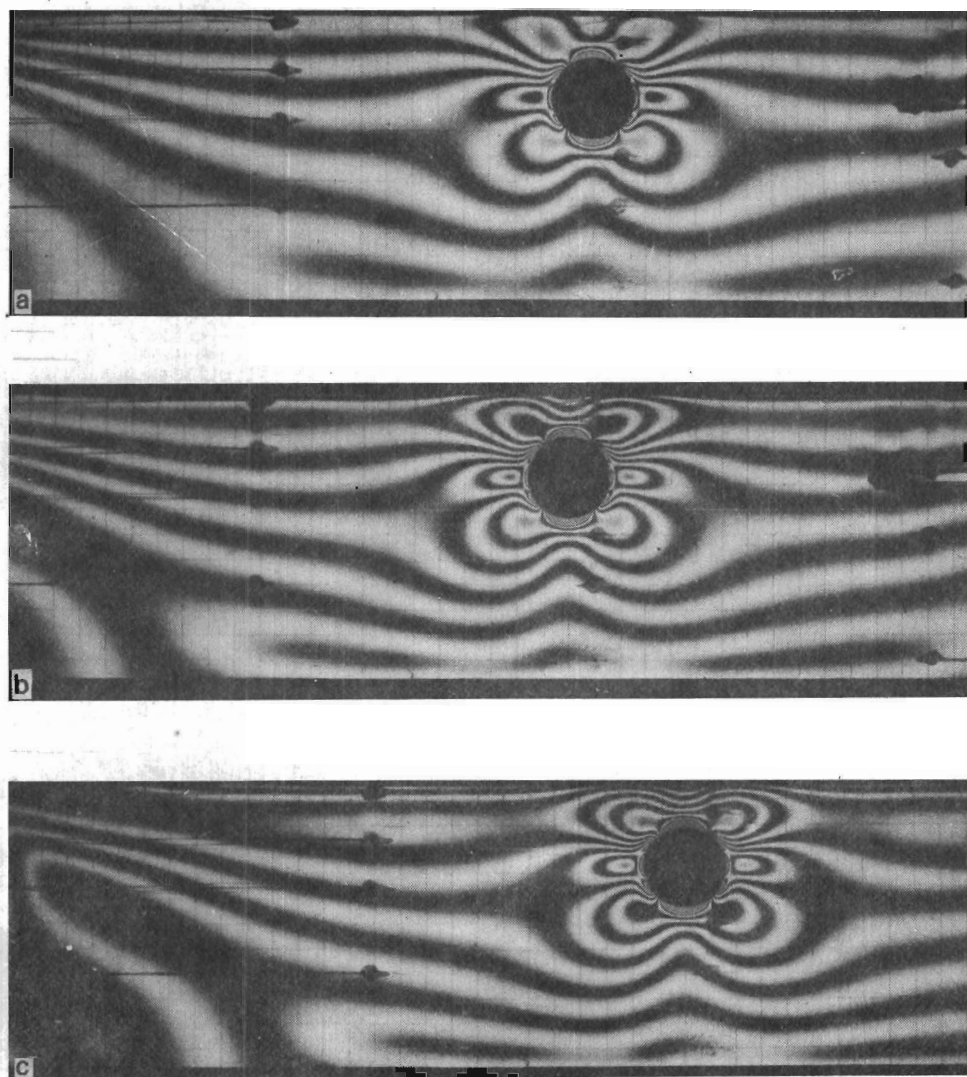
Summary

The paper deals with photothermoelastic analysis of thermal stresses that arise around a hole in the web of I-beam with cooled flange. The transient stress distribution around the hole boundary were determined.

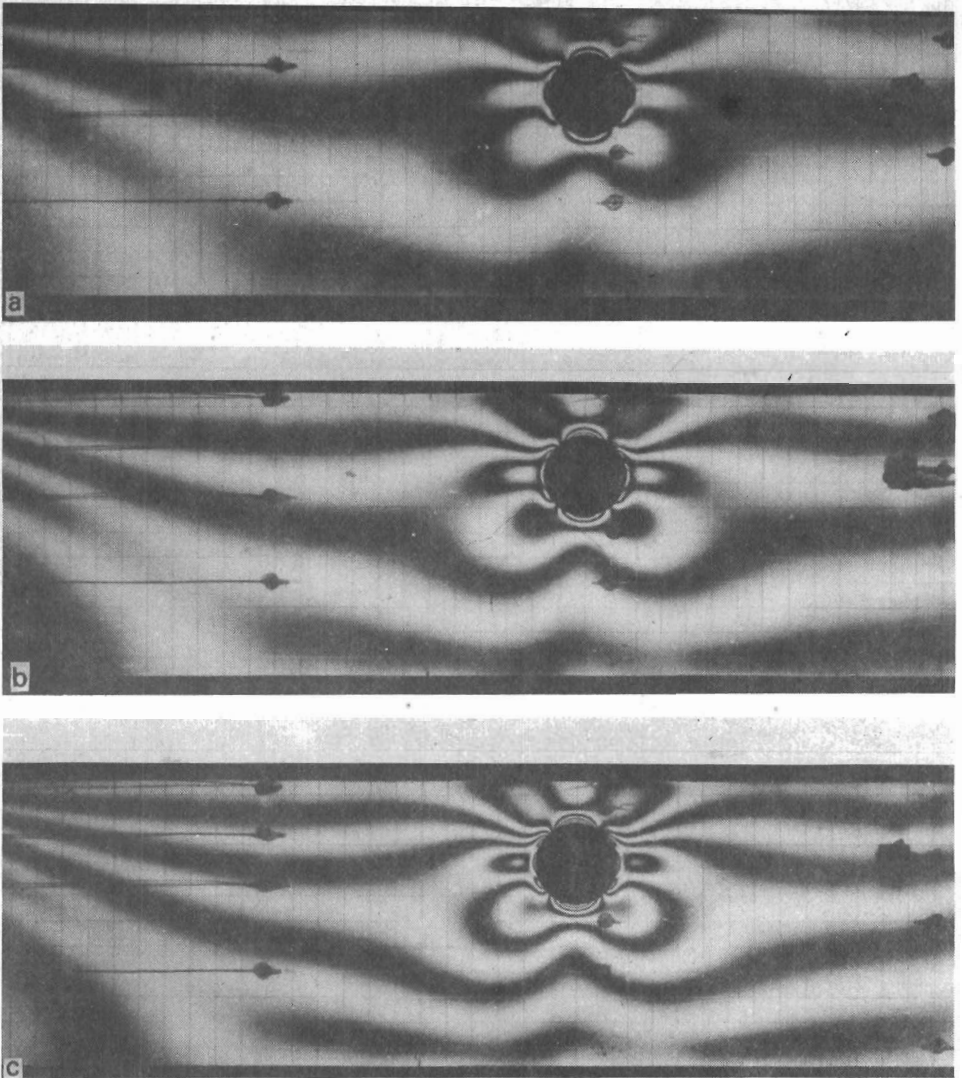
Резюме

В статье представлены исследования температурных напряжений поляризационно-оптическим методом в модели двутавровой балки с круглым отверстием в стенке. Одна полка балки охлаждена. Исследовано распределение неустановившихся температурных напряжений в области края отверстия.

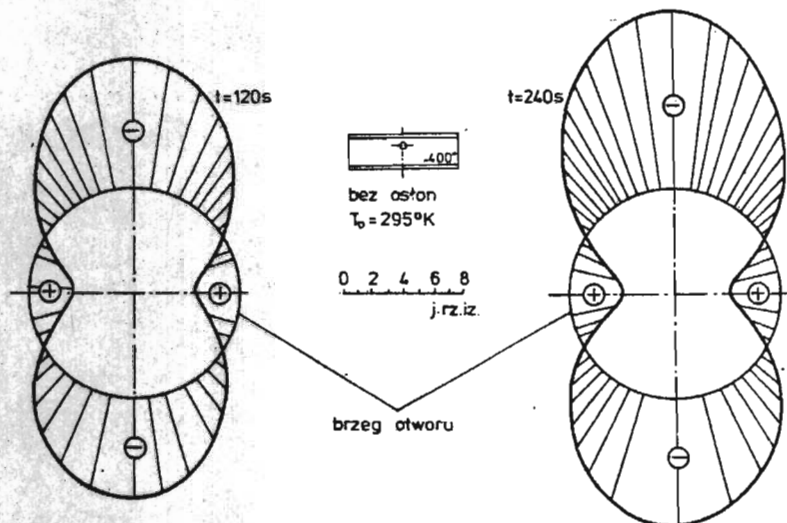
Praca wplynęła do Redakcji dnia 20 czerwca 1988 roku



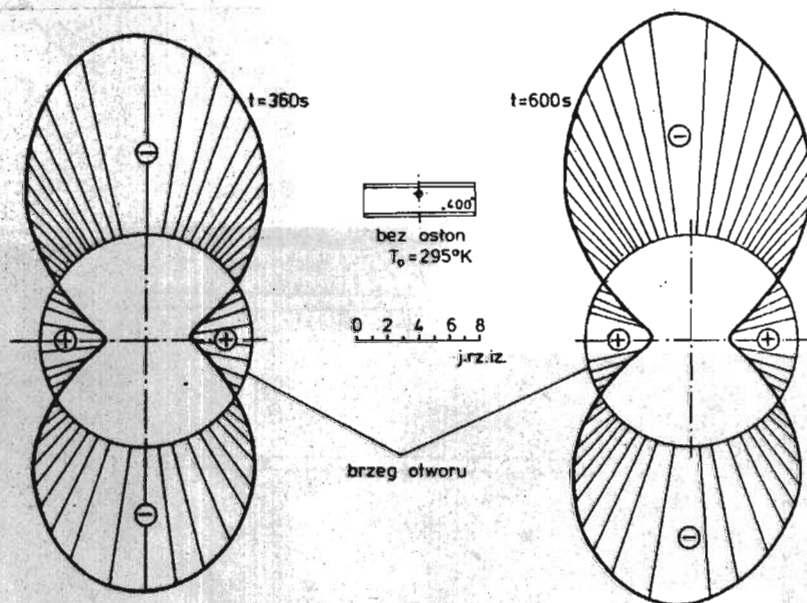
Rys. 3.



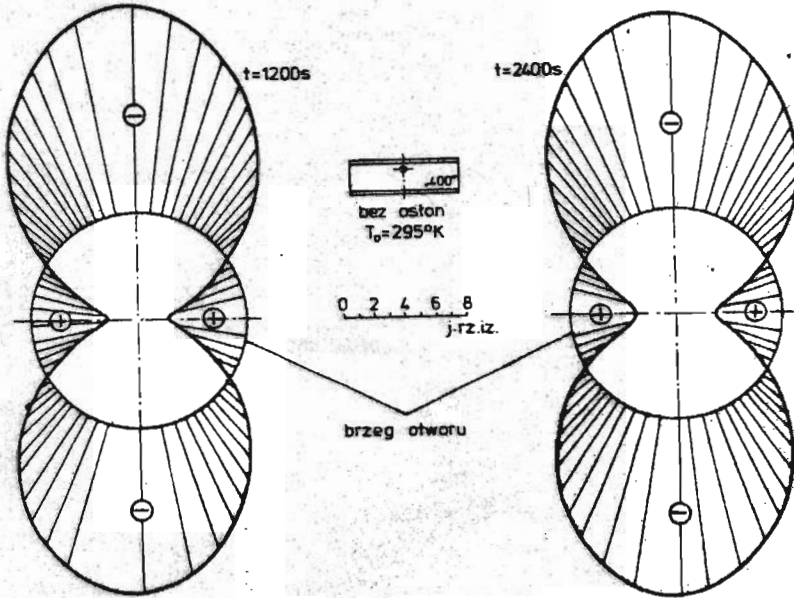
Rys. 4.



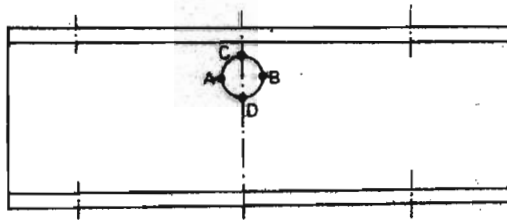
Rys. 5.



Rys. 6.

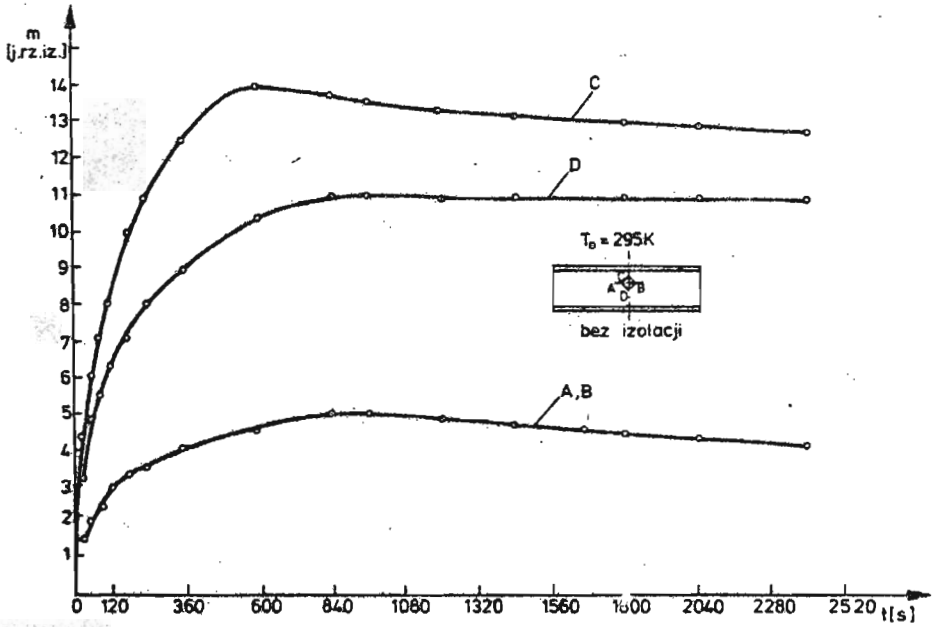


Rys. 7.

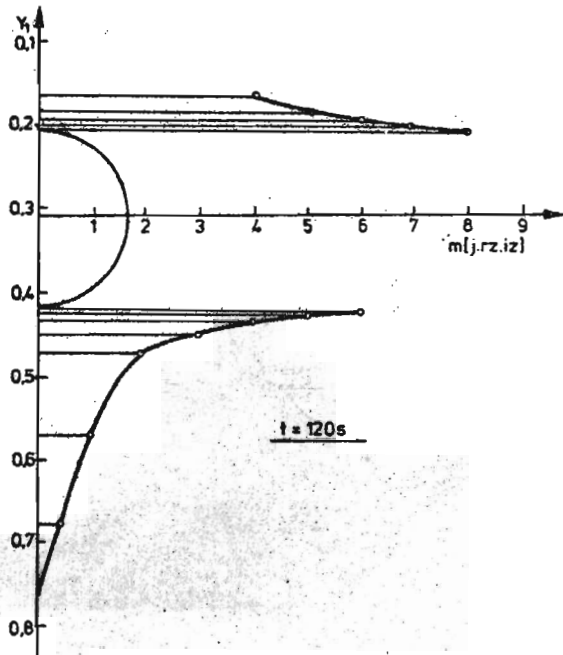


Rys. 8.

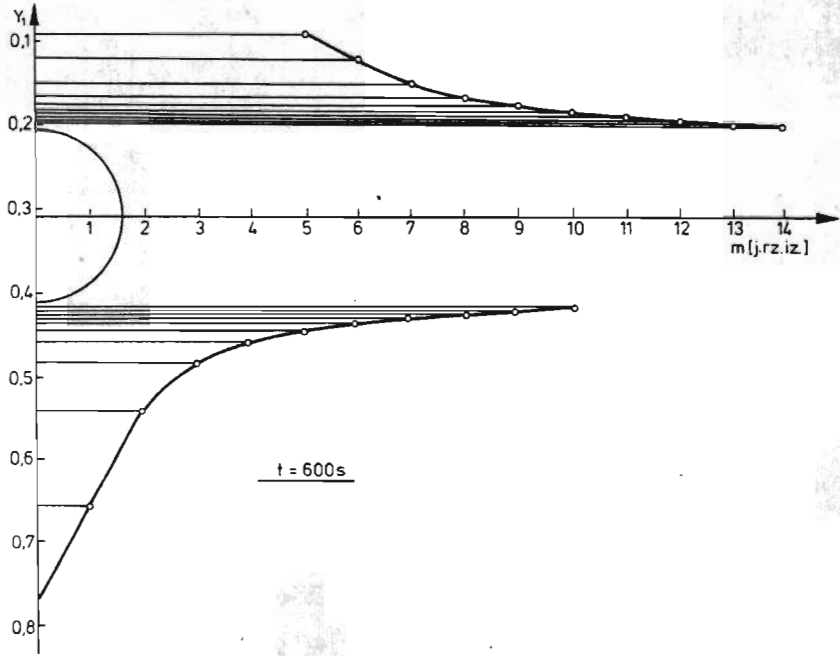
BADANIA TERMOELASTOPTYCZNE



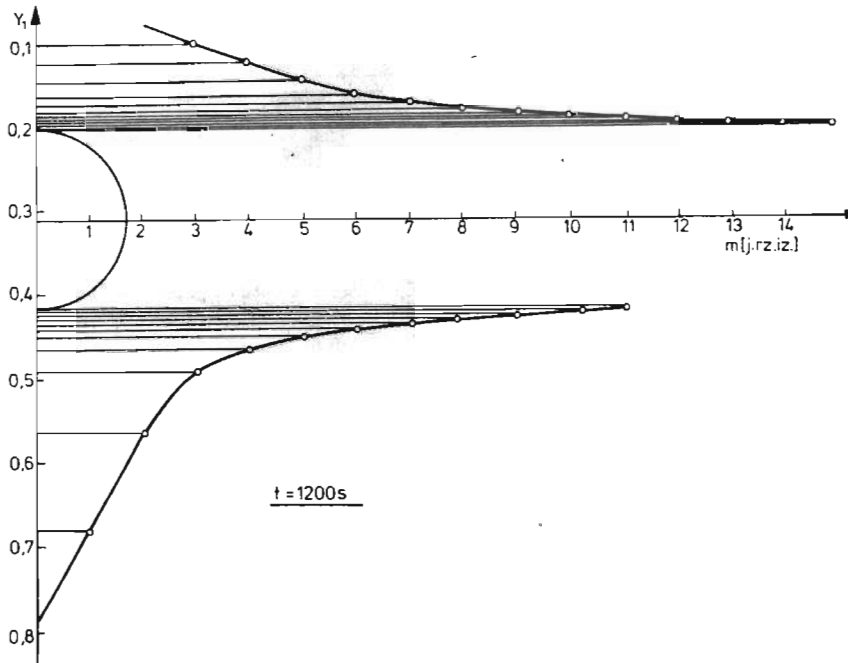
Rys. 9.



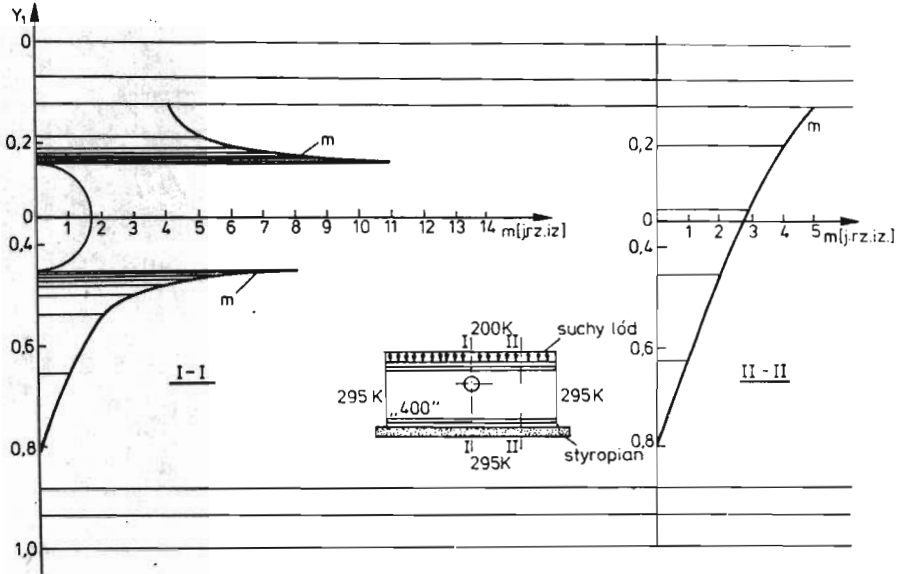
Rys. 10.



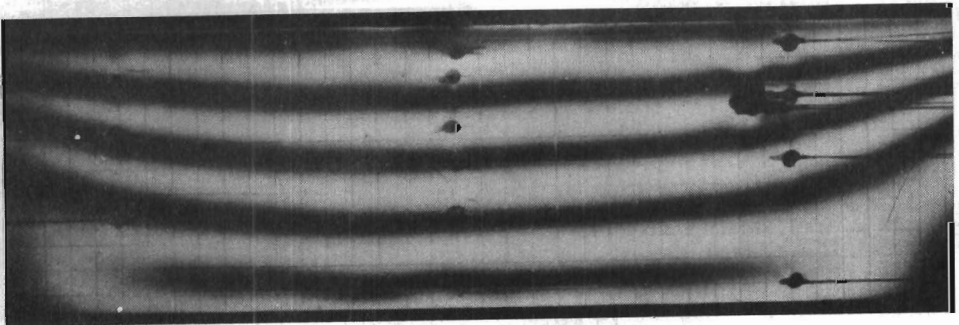
Rys. 11.



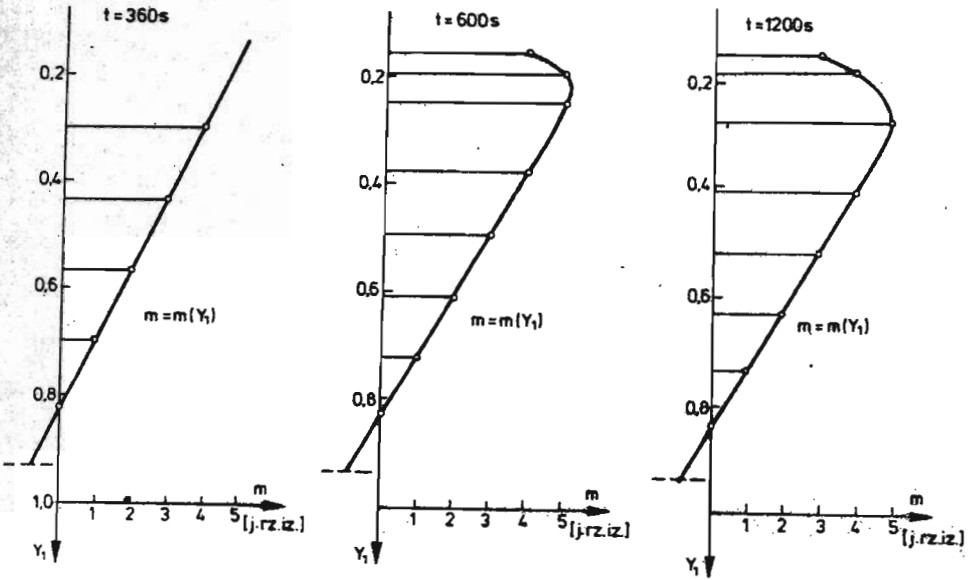
Rys. 12.



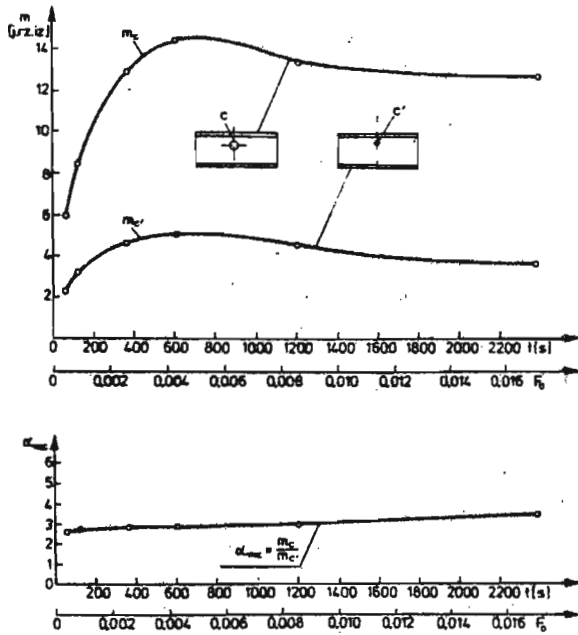
Rys. 13.



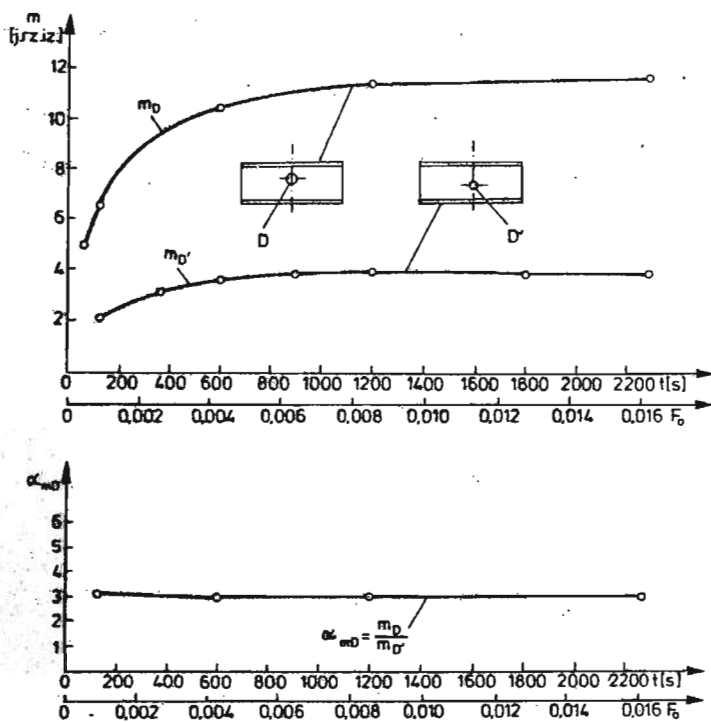
Rys. 14.



Rys. 15.



Rys. 16.



Rys. 17.