

ZDZISŁAW DYLAŃ I ZBIGNIEW ORŁOŚ

ANALIZA MOŻLIWOŚCI PÓLTREPANACJI WIELOOTWOROWEJ
W PRZYPADKU JEDNOOSIOWEGO STANU NAPRĘŻENIA

ROZPRAWY
INŻYNIERSKIE
CLXXVIII

TOM VIII • ZESZYT 4 • ROK 1960

SPIS TREŚCI

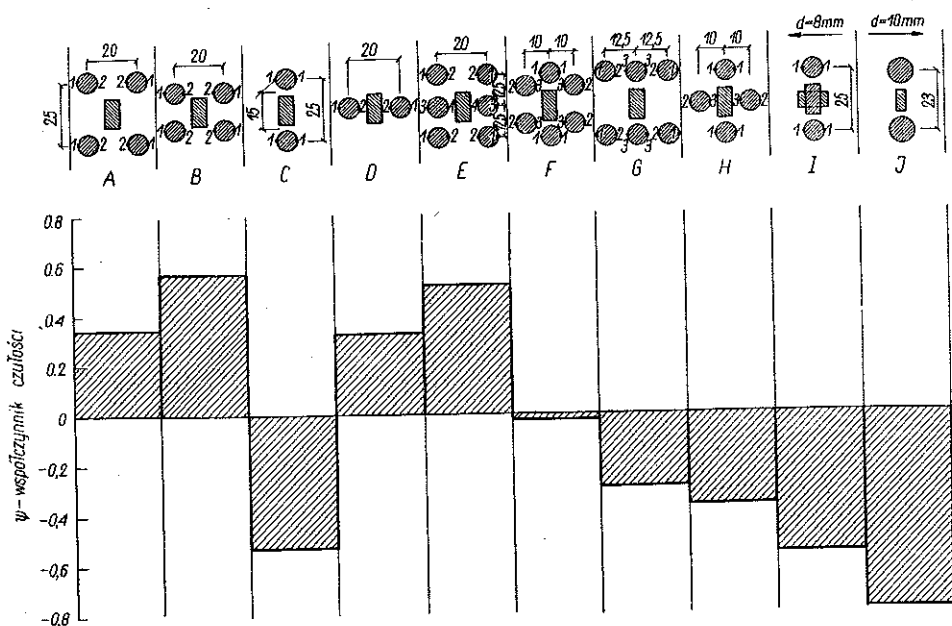
1. Metoda półtrepanacji wielootworowej	847
2. Zagadnienie czułości pomiaru w metodach półtrepanacyjnych	848
3. Badania tensometryczne przy różnych układach otworów	849
4. Zastosowanie analizy wymiarowej do oceny otrzymanych wyników	856
5. Badania elastooptyczne	859
6. Spiętrzenie naprężeń wywołane nawiercaniem	864
7. Wnioski	865

1. Metoda półtrepanacji wielootworowej

Przy rozwiązywaniu szeregu zagadnień z zakresu doświadczalnej analizy naprężeń musimy niejednokrotnie dokonywać pomiary odkształceń bez możliwości dowolnego przykładania lub usuwania obciążeń, wywołujących badane stany naprężenia. W przypadkach tych dobre usługi oddają metody lokalnego odciążania lub spiętrzania, do których należą metody półtrepanacyjne i trepanacyjne, [1], [2], [3], [4].

O tym jaka metoda jest najwłaściwsza dla konkretnego przypadku decydują z jednej strony warunki, w których ma być dokonany pomiar, z drugiej strony dążenie do uzyskania jak największej czułości pomiaru. Podstawy teoretyczne metod półtrepanacyjnych zawarte są w pracy [4]. Z wymienionych metod w praktycznym zastosowaniu okazały się najwygodniejsze: metoda lokalnego odciążania za pomocą nacinania, [2], i metoda nawiercania, [3]. Pierwsza metoda jest dokładniejsza od drugiej. W praktyce zdarzają się jednak sytuacje, w których zastosowanie metody lokalnego odciążania nacinaniem jest utrudnione. Zachodzi to w przypadku badania wewnętrznych obszarów elementów konstrukcyjnych. Można wtedy zastosować metodę nawiercania. Metoda półtrepanacji jednootworowej, przedstawiona w pracy [3], poza szeregiem zalet odznacza się tą niedogodnością, że czułość jej jest niewielka i nie daje się podwyższyć nawet kosztem użycia większej liczby czujników i stosowania układu samokompensacyjnego. Te względy skłoniły autorów do opracowania metody dogodniejszej, w której wykorzystuje się efekt wielokrotnych nawierceń. Myślą przewodnią było dążenie do zwiększenia czułości pomiaru drogą zwiększenia efektu lokalnego odciążania lub przeciążania za pomocą nawiercania bez zwiększania czułości aparatury pomiarowej. Cel ten zrealizowano za pomocą metody półtrepanacji wielootworowej.

W pracy [6] opisane są pewne badania stanu naprężenia przy zastosowaniu dwóch otworów i jednego czujnika czynnego, umieszczonego pomiędzy otworami (podobnie do układów *C* i *I*, rys. 1). Zastosowano przy tym nawiercania o stosunkowo dużej średnicy w porównaniu z bazą czujnika, uzyskując w warunkach laboratoryjnych dość znaczne częściowe odciążenie obszaru między otworami. Zdaniem autorów w warunkach polowych bardziej prak-



Rys. 1. Układy otworów i wartości współczynnika czułości

tycznym będzie zastosowanie otworów o mniejszej średnicy i z tego względu w niniejszej pracy wzięto pod uwagę małe otwory.

Ponadto rozpatrzono również układy o liczbie otworów większej od dwóch i układy samokompensacyjne.

2. Zagadnienie czułości pomiaru w metodach półtrepanacyjnych

Wywołany zabiegiem półtrepanacyjnym przyrost odkształcenia $\Delta \bar{\epsilon}_x$, mierzony pojedynczym czujnikiem o kierunku równoległym do kierunku wyznaczonego naprężenia głównego σ , można wyrazić wzorem, [3] i [4].

$$(2.1) \quad \Delta \bar{\epsilon}_x = \psi \epsilon_0^0,$$

gdzie ψ oznacza współczynnik czułości, określający jaką część odkształcenia jednostkowego $\epsilon_0 = \sigma/E$, odpowiadającego wyznaczanemu naprężeniu σ , mierzy czujnik elektrooporowy.

W pracy [4] przeprowadzono szczegółową analizę wartości współczynnika ψ dla różnych położeń czujnika w stosunku do jednego otworu odciążającego. W praktycznie możliwych położeniach wartości tego współczynnika nie przekraczają liczby 0,25, gdy baza czujnika jest styczną do otworu, oraz liczby 0,30, gdy baza czujnika jest skierowana wzdłuż osi otworu.

Zastosowanie układu samokompensacyjnego złożonego z czterech czujników pomiarowych (dwóch o bazach stycznych do otworu i dwóch o bazach skierowanych wzdłuż osi otworu) umożliwia zwiększenie czułości do wartości 0,50.

W celu uzyskania większej czułości bez potrzeby wprowadzania dodatkowych trzech czujników autorzy zbadali szereg niżej podanych układów otworów wykonywanych w sąsiedztwie jednego czynnego czujnika pomiarowego.

W pracy [6] autorzy stosują współczynnik a określony wzorem

$$(2.2) \quad a = \frac{\sigma_0}{\sigma},$$

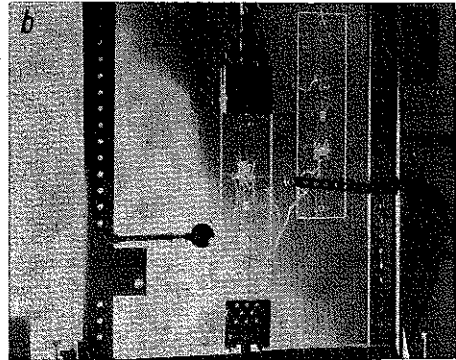
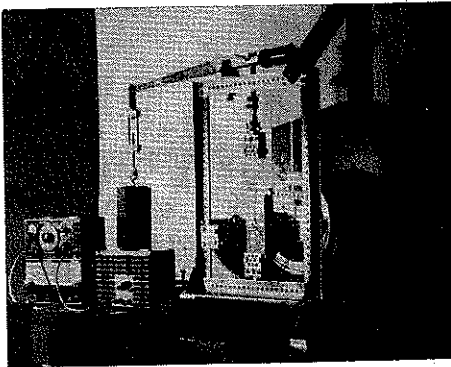
gdzie σ oznacza nominalne naprężenie wyznaczone metodą półtrepanacji, σ_0 naprężenie przyjęte jako pozostałe w materiale pod czujnikiem pomiarowym po procesie półtrepanacji. Można łatwo stwierdzić, że między współczynnikiem czułości ψ a współczynnikiem a istnieje związek

$$(2.3) \quad \psi = 1 - a.$$

Wypada zauważyć, że określenie σ_0 jako naprężenia pozostałego w materiale po półtrepanacji ma raczej charakter umowny, gdyż w rzeczywistości a obliczone jest na podstawie odkształcenia mierzonego czujnikiem pomiarowym, odpowiadającego odkształceniu średniemu wzdłuż poszczególnych odcinków przewodników czujnika elektrooporowego. Dalszym uproszczeniem w pracy [6] jest stosowanie w rozważaniach teoretycznych rozwiązania HOWLANDA, [7], dla przypadku rozciągania tarczy nieograniczonej z nieograniczoną liczbą otworów o jednakowych średnicach, rozmieszczonych w równych odległościach wzdłuż jednej osi.

3. Badania tensometryczne przy różnych układach otworów

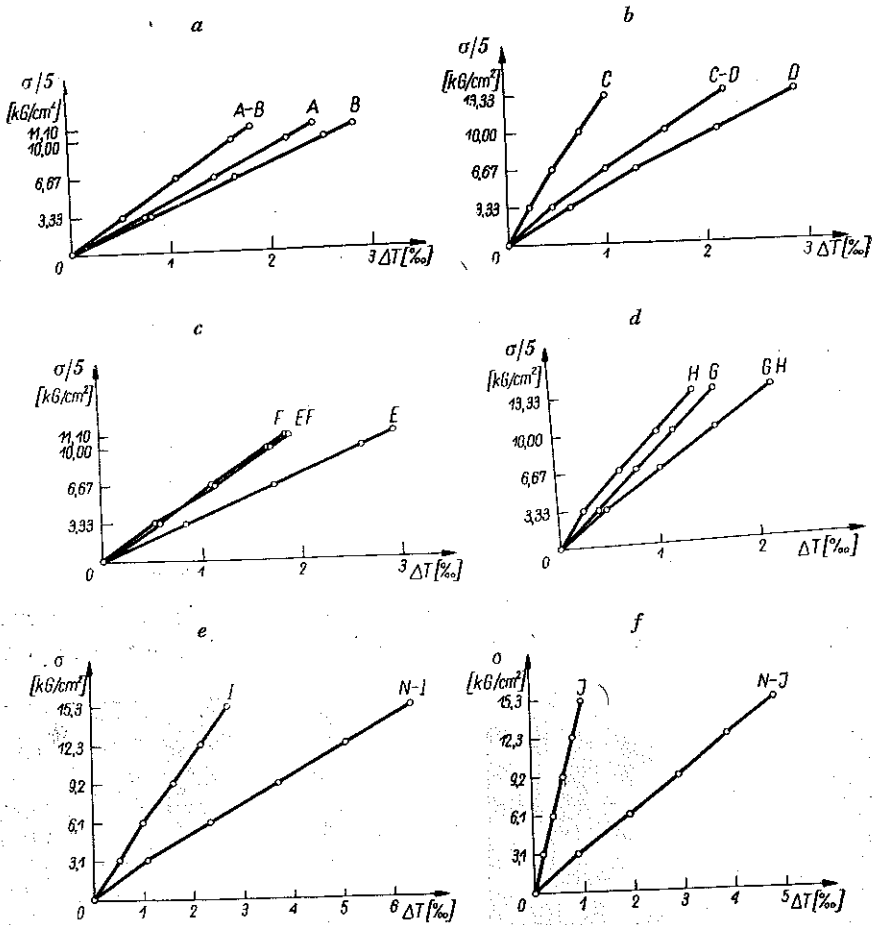
Analityczne określenie rozkładu naprężeń w nieograniczonych tarczach płaskich, zawierających większą (ograniczoną) liczbę otworów, jest teoretycznie



Rys. 2. a) Ogólny widok stanowiska do badań tensometrycznych. b) Jeden z modeli w układzie obciążającym, obok drugi—model z czujnikiem kompensacyjnym

możliwe, lecz w praktyce prowadzi do bardzo zawiłych zależności. W przypadku rozciąganej tarczy z dwoma otworami odpowiednie rozwiązanie uzyskał C. B. LING, [5].

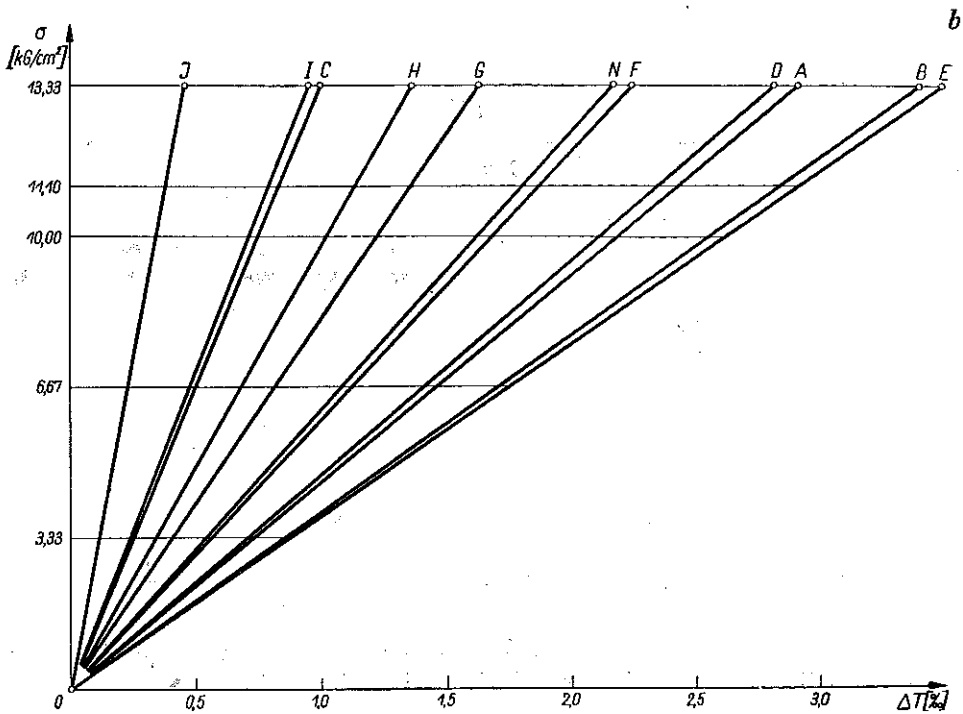
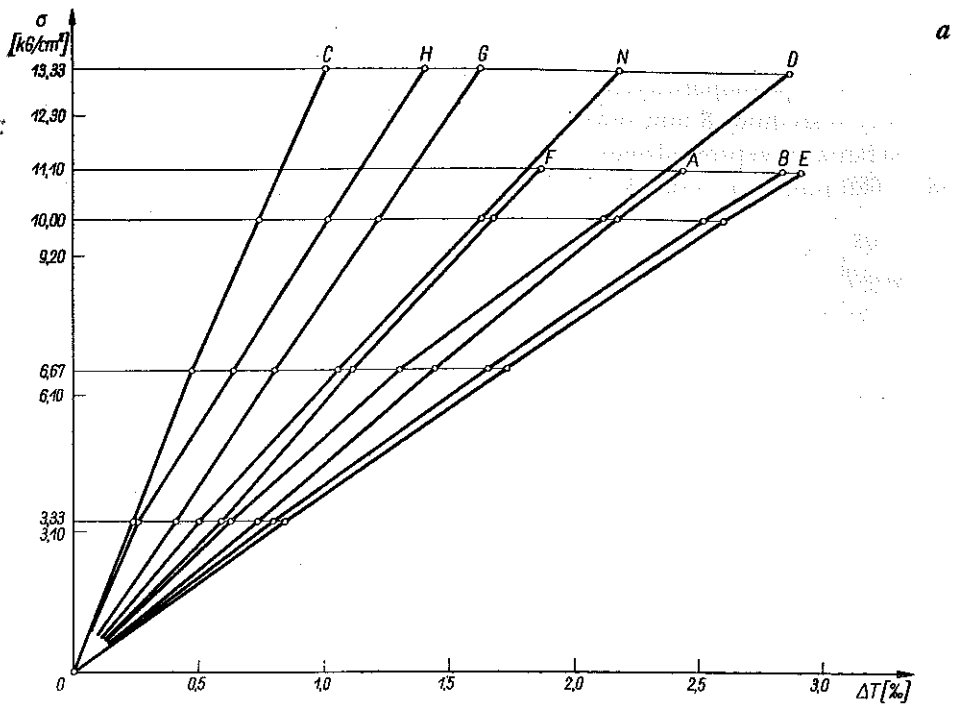
Rozwiązanie LINGA umożliwia wyznaczenie wartości naprężeń w charakterystycznych punktach tarczy. Zastosowanie rozwiązania LINGA do teoretycznej analizy współczynnika czułości jest związane ze znacznymi trudnościami rachunkowymi, wynikającymi m.i. z konieczności uwzględnienia charakterystycznego ukształtowania czujnika elektrooporowego. W związku z tym



Rys. 3. Uzyskane na drodze pomiarów tensometrycznych zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$: a) dla układu A i B, b) dla układu C i D, c) dla układu E i F, d) dla układu G i H, e) dla układu I, f) dla układu J. Na osi ΔT wykresów na rys. e i f zamiast 1, 2, 3... ma być 0,1; 0,2; 0,3...

zastosowano sposób doświadczalny jako szybciej prowadzący do celu, stanowiący bezpośrednią weryfikację metody. Przy większej liczbie otworów od dwóch trudności w matematycznym ujęciu zagadnienia wzrastają do tego stopnia, że metoda doświadczalna staje się praktycznie jedynie możliwa.

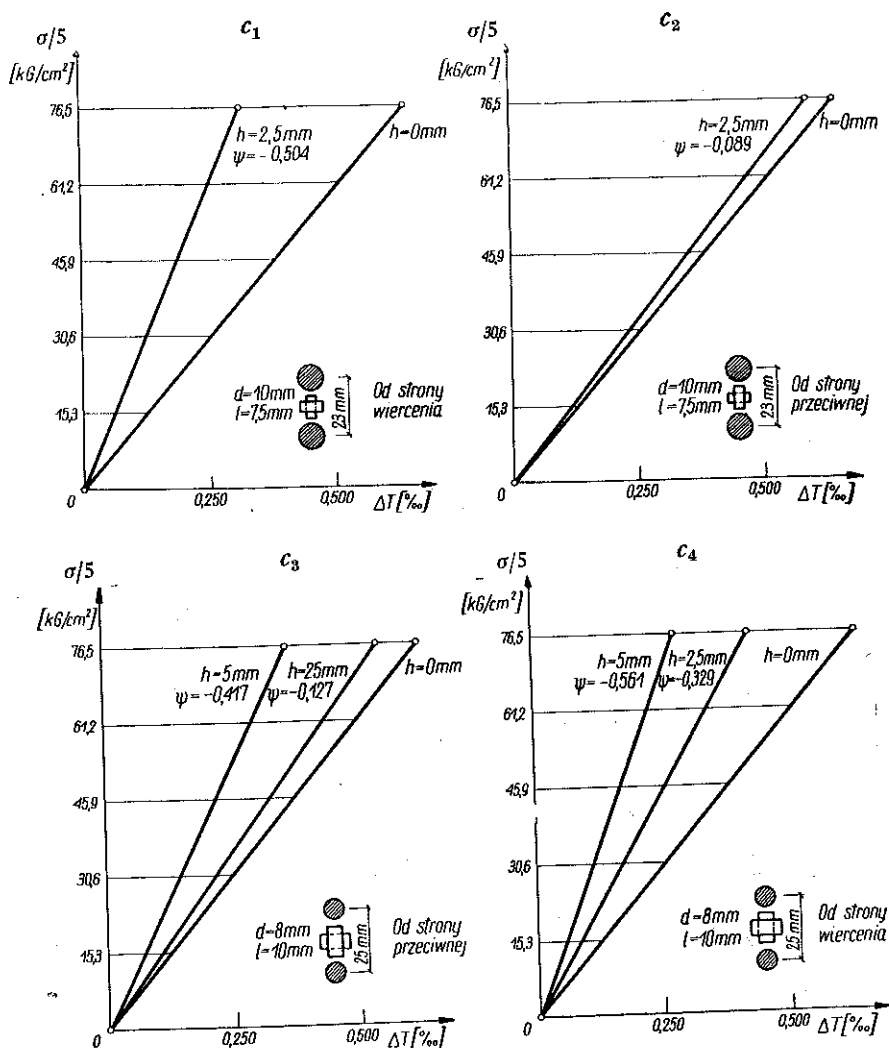
Do badań doświadczalnych wytypowano układy otworów przedstawione na rys. 1. Przedstawione są wywiercone otwory i rozmiary czynnej powierzchni



Rys. 4. a) Zestawienie zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$ uzyskanych drogą pomiarów tensometrycznych dla układów otworów od A do H. b) Zestawienie zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$ dla układów otworów od A do J po przeprowadzeniu rachunku wyrównawczego

czujników elektrooporowych. W badaniu zastosowano czujniki RL 10/120 i otwory o średnicy 8 mm oraz czujniki RL 7/60 i otwory o średnicy 10 mm.

Badania przeprowadzono na płaskownikach z plexiglasu o wymiarach 98×680 mm i grubości 5 mm i z żywicy poliestrowej CR 39 o wymiarach



Rys. 4. c) Zestawienie zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$ dla układów samokompensacyjnych (po przeprowadzeniu rachunku wyrównawczego)

98×400 mm i grubości 4,6 mm. Widok stanowiska badawczego pokazany jest na rys. 2a, widok modelu z naklejonymi czujnikami oraz element kompensacyjny — na rys. 2b.

Płaskownik poddawano jednoosiowemu rozciąganiu po naklejeniu 2 czujników elektrooporowych i wywierceniu wokół jednego z nich układu otworów

Tablica 1. Wyniki pomiarów i ich wyrównywanie

Układ otworów	Obciążenie na dźwigni P (kG)	Naprężanie nominal. σ (kG/cm ²)	Odczyt T_1 $\frac{\circ}{\infty}$	Przyrost ΔT_1 $\frac{\circ}{\infty}$	Odczyt T_2 $\frac{\circ}{\infty}$	Przyrost ΔT_2 $\frac{\circ}{\infty}$	Przyrosty śred. $\Delta T_{\text{śr}}$ $\frac{\circ}{\infty}$	P^2	$P \Delta T_{\text{śr}}$	$\frac{\Sigma P \Delta T_{\text{śr}}}{\Sigma P^2}$
C	1,6+0	0	16,270	0,240	16,265	0,235	0,238	225	3,6	
	1,6+15	16,65	16,510	0,460	16,500	0,485	0,473	900	14,2	
	1,6+30	33,35	16,730	0,750	16,750	0,745	0,748	2025	33,6	
	1,6+45	50,00	17,020	1,020	17,010	1,015	1,018	3600	61,0	
	1,6+60	66,65	17,290	-0,005	17,280	0,005	0,000	6750	112,4	0,0167
	1,6+0	0	16,265		16,270					
C-D (bez otworów)	1,6+0	0	20,430	0,460	20,450	0,460	0,460	225	6,9	
	1,6+15	16,65	20,890	1,005	20,910	1,000	1,003	900	30,1	
	1,6+30	33,35	21,435	1,615	21,450	1,565	1,590	2025	71,5	
	1,6+45	50,00	22,045	2,190	22,015	2,170	2,180	3600	131,0	
	1,6+60	66,65	22,620	0,020	22,620	0,000	0,010	6750	239,5	0,0355
	1,6+0	0	20,450		20,450					

odciążających (lub przeciążających). Drugi z czujników, naklejony z dala od otworów, mierzył odkształcenia w obszarze równomiernego rozkładu naprężeń.

Wyniki pomiarów odkształceń (rys. 3) i przebieg rachunku wyrównawczego (metodą najmniejszych kwadratów) jest przedstawiony przykładowo w tablicy 1 dla czujnika w układzie C, i odpowiadającego mu czujnika C-D w obszarze równomiernego rozkładu naprężeń.

Zestawienie wykresne zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$ dla poszczególnych układów otworów przedstawia rys. 4a. Na rysunku tym linia oznaczona literą N została wykreślona na podstawie wartości uzyskanych jako średnie arytmetyczne z pomiarów wykonywanych w obszarach równomiernego rozkładu naprężeń, odpowiadających każdemu z rozważanych układów otworów. Otrzymane wyniki wykazują, że zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$ w badanych przypadkach mają charakter liniowy. Na rysunku 4b przedstawiono zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$ po wyrównaniu ich metodą najmniejszych kwadratów.

Tablica 2. Wartości współczynnika czułości pomiaru

Układ	$(\Delta T)_s$	$(\Delta T)_r$	ψ	φ
<i>l</i>	‰	‰	—	—
A	0,0486	0,0362	+0,342	+2,92
B	0,0567	0,0362	+0,567	+1,77
C	0,0167	0,0355	-0,530	-1,89
D	0,0470	0,0355	+0,324	+3,09
E	0,0582	0,0385	+0,512	+1,95
F	0,0374	0,0385	-0,029	-34,50
G	0,0272	0,0361	-0,247	-4,05
H	0,0227	0,0361	-0,371	-2,70
I	0,0368	0,0838	-0,561	-1,78
J	0,0138	0,0649	-0,788	-1,27

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów można wyznaczyć współczynnik czułości pomiaru ψ :

$$(3.1) \quad \psi = \frac{(\Delta T)_s - (\Delta T)_r}{(\Delta T)_r},$$

gdzie $(\Delta T)_s$ oznacza przyrost odkształcenia, mierzony w sąsiedztwie otworów, $(\Delta T)_r$ przyrost odkształcenia mierzony w obszarze równomiernego rozkładu naprężeń.

Na podstawie wzoru (3.1) obliczono wartości współczynnika ψ dla układów otworów od A do J; wartości te przedstawiono w tablicy 2 i na rys. 1.

Podany w tablicy 2 współczynnik φ obliczono według wzoru (3.2):

$$\varphi = \frac{1}{\psi}.$$

Współczynnik φ podaje, ilokrotnie należy zwiększyć zmierzone odkształcenie (wywołane półtrepanacją), aby uzyskać odkształcenie nominalne.

Znak plus w tablicy 2 oznacza, że czujnik czynny pracuje w obszarze przeciążanym zabiegiem półtrepanacyjnym, znak minus oznacza, że czujnik pracuje w obszarze odciążanym tym zabiegiem.

Obecnie omówimy szczegółowiej samokompensacyjny układ czujników według schematu na rys. 1. Układ ten polega na naklejeniu w badanym obszarze dwóch czujników pomiarowych — czynnego i kompensacyjnego. Jeden z czujników leży wzdłuż osi obu otworów, drugi jest do tej osi prostopadły. Czujniki nakleja się jeden na drugim. Przez włączenie czujnika czynnego i kompensacyjnego w przeciwległe gałęzie mostka tensometrycznego uzyskuje się efekt sumowania bezwzględnych wartości odkształceń o znakach przeciwnych.

W układzie tym zastosowano czujniki o bazach 7,5 i 10 mm. W czasie każdorazowego badania naklejano po dwa układy samokompensacyjne po dwóch przeciwległych stronach modelu z tym, że w jednym układzie czujnik podłużny był naklejony na spodzie, a w drugim czujnik poprzeczny był na spodzie.

Wykonując zabiegi półtrepanacyjne dla tych układów określono wartości współczynników czułości ψ (tablica 2 — I i rys. 4c), wyjaśniono zależności pomiędzy głębokością nawierczanych otworów a wartością ψ oraz wpływ na wartość ψ wzajemnego położenia czujników: poprzecznego i podłużnego.

W porównaniu z przypadkiem C zwiększenie wartości współczynnika ψ dla układu I wyniosło 6% (dotyczyło to układu, w którym czujnik podłużny był na spodzie, rys. 4c₃).

Dla zbadania wpływu głębokości h nawiercania na wartość ψ wykonano dla omawianych układów samokompensacyjnych nawiercanie w 2 etapach: w pierwszym — do głębokości równej 1/2 grubości modelu, tj. do $h = 2,5$ mm, w drugim na wskroś, tj. $h = 5$ mm. Wyniki przedstawiono na rys. 4c w postaci zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$. Wykresy sporządzono na podstawie trzech lub czterech serii pomiarów wykonywanych dla każdego etapu nawiercania po wyrównaniu otrzymanych wyników metodą najmniejszych kwadratów. Na rysunkach przy poszczególnych wykresach zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$ oznaczono wartości głębokości nawiercania h , podano wartości współczynnika ψ , odpowiadające poszczególnym etapom nawiercania, oraz pokazano schematycznie wzajemne usytuowanie czujników. Rysunki 4c₁ i 4c₂ przedstawiają zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$ dla czujników o $l = 7,5$ mm. Rysunek 4c₁ dotyczy układu naklejonego od strony nawiercania, rys. 4c₂ od strony przeciwnej.

Rysunki 4c₃ i 4c₄ przedstawiają zależności $\sigma = \sigma(\Delta T)$ dla czujników o $l = 10$ mm. Rysunek 4c₃ dotyczy układu naklejonego od strony nawiercania, rys. 4c₄ — od strony przeciwnej.

Jak widać, przyrosty wartości ψ w zależności od h mają charakter nieliniowy, przy czym od strony nawiercania otrzymuje się przebieg bardziej równomierny.

Jeśli chodzi o zagadnienie wzajemnego usytuowania czujników, to porównując wyniki przedstawione na rys. 4c dochodzimy do wniosku, że korzystniejsze rezultaty (większe wartości ψ) przy danych parametrach układu pomiarowego uzyskuje się w przypadku umieszczenia czujnika podłużnego na spodzie. Czujnik ten badany pojedynczo w porównaniu z czujnikiem poprzecznym wykazał większe wartości przyrostów odkształceń.

4. Zastosowanie analizy wymiarowej do oceny otrzymanych wyników

W celu określenia wpływu poszczególnych parametrów układu półtrepanacji wielootworowej na wartość współczynnika czułości ψ zastosowano dla podstawowego układu C analizę wymiarową, [9].

Analiza ta przez wprowadzenie pewnych bezwymiarowych parametrów charakteryzujących rozpatrywany układ umożliwia w sposób ogólny określenie zależności pomiędzy rozważanymi wielkościami. Parametry te określamy za pomocą wielkości fizycznych opisujących badane zjawisko. W rozpatrywanym przez nas zagadnieniu mamy do czynienia z następującymi wielkościami fizycznymi:

- d średnica otworów [mm],
- l długość bazy pomiarowej czujnika [mm],
- g grubość badanego elementu [mm],
- a szerokość badanego elementu [mm],
- b odległość pomiędzy otworami [mm],
- s szerokość czynna czujnika [mm],
- n ilość równoległych odcinków przewodnika w czujniku,
- E stała sprężystości podłużnej materiału [kG/cm²],
- K stała czujnika elektrooporowego,
- ν współczynnik POISSONA,
- σ naprężenia normalne [kG/cm²],
- ψ współczynnik czułości.

Zgodnie z zasadami analizy wymiarowej można dla określenia wartości parametrów bezwymiarowych wziąć pod uwagę tylko te wielkości, które mają główny wpływ na przebieg badanego zjawiska. Ponadto pomijamy te wielkości, które w poszczególnych eksperymentach nie ulegają zmianom. W związku z tym pominiemy g , a , E , K , ν i σ ze względu na to, że w porównywanych doświadczeniach wielkości te były identyczne. Wielkości s i n dla uproszczenia pomijamy, co odpowiada przypadkowi zastosowania czujników o takiej samej szerokości i ilości równoległych odcinków przewodnika. Po przyjęciu powyższych założeń będziemy poszukiwali zależności:

$$(4.1) \quad \psi = f(l, b, d).$$

Wprowadzimy wielkość bezwymiarową δ określoną wzorem

$$(4.2) \quad \delta = \frac{lb}{d^2}$$

Wprowadzenie tej wielkości nie tylko umożliwi analizę otrzymanych wyników, lecz również pozwoli porównać je z wynikami uzyskanymi w pracy [6].

W tabelicy 3 zestawiono wartości ψ i współczynnika δ obliczone na podstawie danych doświadczalnych.

Tablica 3. Zestawienie wartości ψ i δ .

Wielkość	Jednostki	Dla układu C	Dla układu I	Według pracy [6]
ψ	—	-0,530	-0,788	-0,866
l	mm	10,0	7,5	10,0
b	mm	25,0	23,0	40,0
d	mm	8,0	10,0	19,3
$\delta = \frac{lb}{d^2}$	—	3,91	1,72	1,07

Wartości te przedstawiono odpowiednio punktami w układzie współrzędnych ψ, δ na rys. 5a. Przyjmując, co wydaje się oczywiste, dla $\delta = 0, \psi = 1$ stwierdzamy, że punkt o tych współrzędnych i punkty ilustrujące badania autorów leżą z dużą dokładnością na jednej prostej. W pobliżu tej prostej leży również punkt o współrzędnych (1,073; 0,866) wyznaczony na podstawie danych z pracy [6]. Odchylenie tego punktu od prostej uzyskanej przez autorów niniejszej pracy jest praktycznie biorąc równe zeru.

A zatem przy podanych poprzednio założeniach upraszczających można do oceny czułości ψ przyjąć bezwymiarową wielkość δ . Stwierdzono przy tym, że związek między δ i ψ ma charakter liniowy w przedziale (0,4) wartości δ , tj.

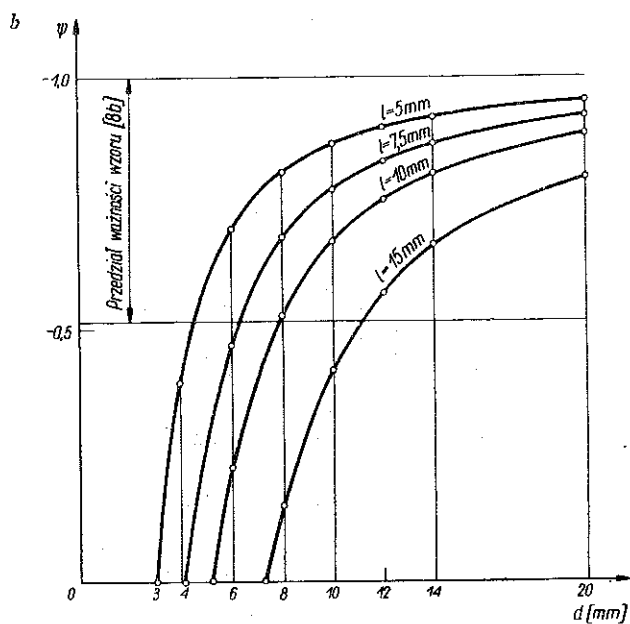
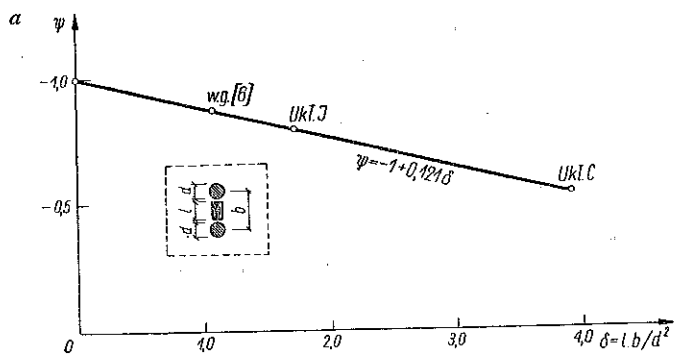
$$(4.3) \quad \psi = -1 + 0,121 \frac{lb}{d^2}$$

Zależność (4.3) pozwala dla danych wartości parametrów d, b i l określić współczynnik czułości ψ .

Na rys. 5b przedstawiono zmienność wartości ψ dla układów typu C i I, w zależności od średnicy otworów odciążających, dla różnych wartości długości baz pomiarowych czujników. Obliczenia poszczególnych wartości dokonano na podstawie wzoru (4.3) przyjmując, że wartość b w przypadkach praktycznych wynosi $b = l + d + 7$ [mm].

Wzór (4.3) przybierze postać

$$(4.3.1) \quad \psi = -1 + 0,121 \frac{l(l+d+7)}{d^2}$$



Rys. 5. a) Wykres zależności $\psi = \psi(\delta)$. b) Wykres zależności $\psi = \psi(d)$ dla różnych długości baz pomiarowych czujnika

Wartości ψ obliczone za pomocą wzoru (4.3.1) zestawione są w tabelicy 4.

Tabela 4. Wartości współczynnika czułości ψ

l [mm]	$d = 4$ [mm]	$d = 6$ [mm]	$d = 8$ [mm]	$d = 10$ [mm]	$d = 12$ [mm]	$d = 14$ [mm]	$d = 20$ [mm]
5	-0,395	-0,700	-0,811	-0,867	-0,899	-0,920	-0,952
7,5	> 0	-0,468	-0,682	-0,778	-0,833	-0,868	-0,922
10	> 0	-0,226	-0,527	-0,673	-0,756	-0,809	-0,888
15	> 0	> 0	-0,150	-0,418	-0,572	-0,667	-0,809

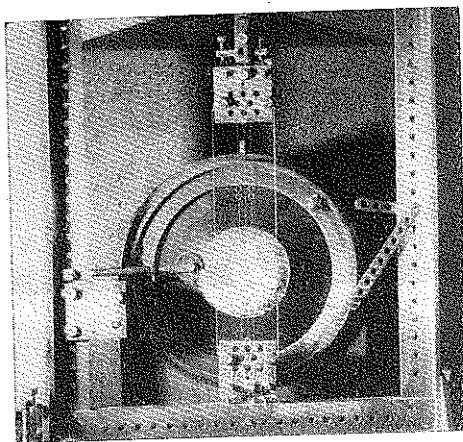
5. Badania elastoptyczne

W celu zbadania rozkładów naprężeń powstałych w wyniku zabiegu półtrepanacji wielootworowej przeprowadzono szereg obserwacji elastoptycznych na próbkach płaskich, wykonanych z żywicy CR-39 o grubości 4,6 mm i stałej modelowej

$$K_m = 41,85 \frac{\text{kG/cm}^2}{\text{rzęd izochromy}}$$

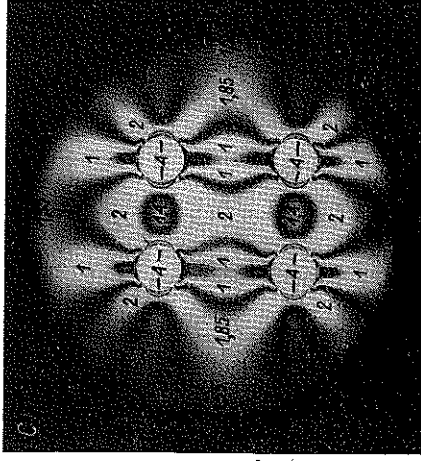
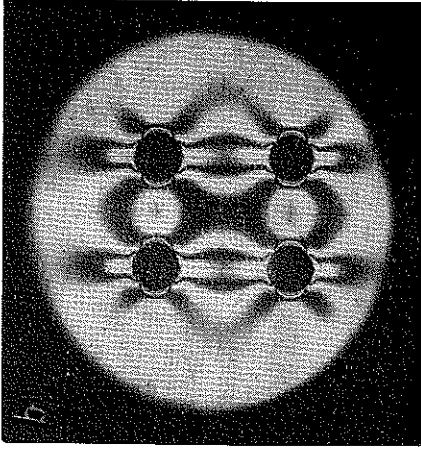
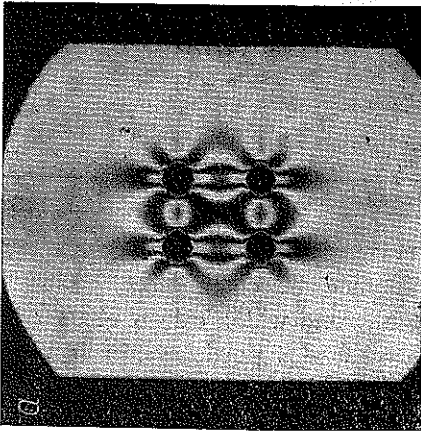
Jeden z badanych modeli zamocowany w układzie obciążającym polaryskopu J-P-1 przy zdjętym analizatorze przedstawia rys. 6. Układy otworów i położenie punktów charakterystycznych rozpatrywanych przekroi przedstawia rys. 1.

W każdym z badanych przypadków wykonano następujące zdjęcia (stosując polaryzację kołową): 1) model nieobciążony, ciemne pole widzenia; 2) jak wyżej, jasne pole widzenia; 3) model obciążony, ciemne pole widzenia; 4) jak poprzednio, jasne pole widzenia; 5) model obciążony, powiększony obraz izochrom w bezpośrednim sąsiedztwie otworów, ciemne pole widzenia; 6) jak poprzednio, jasne pole widzenia; 7) model odciążony, ciemne pole widzenia; 8) jak poprzednio, jasne pole widzenia.

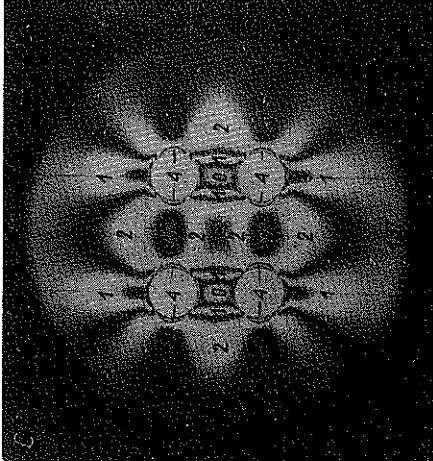
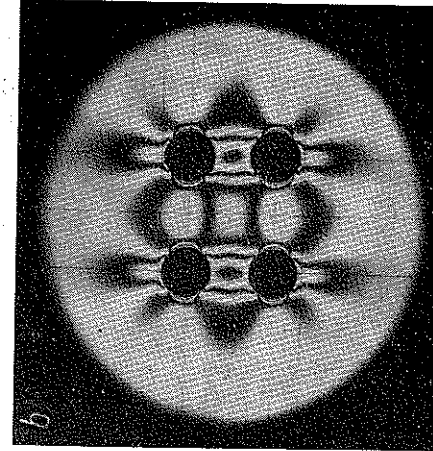
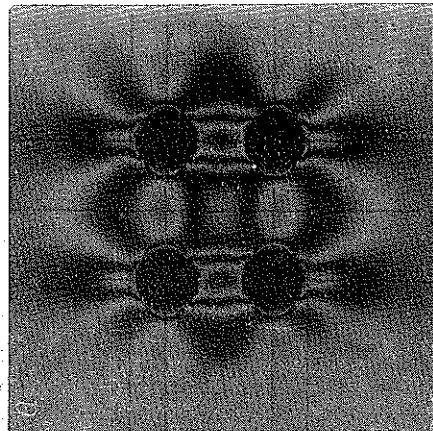


Rys. 6. Jeden z badanych elastoptycznie modeli zamocowany w układzie obciążającym polaryskopu (po zdjęciu analizatora)

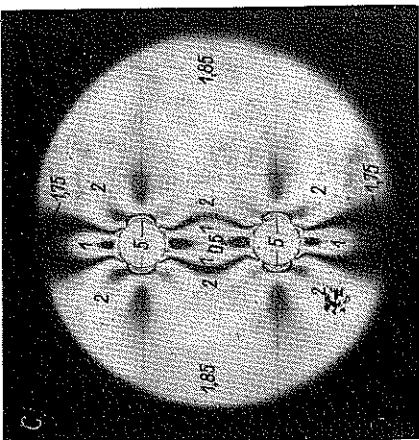
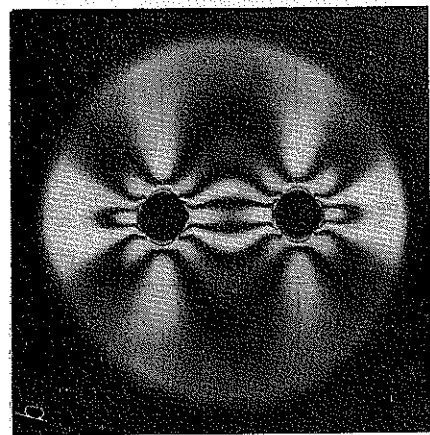
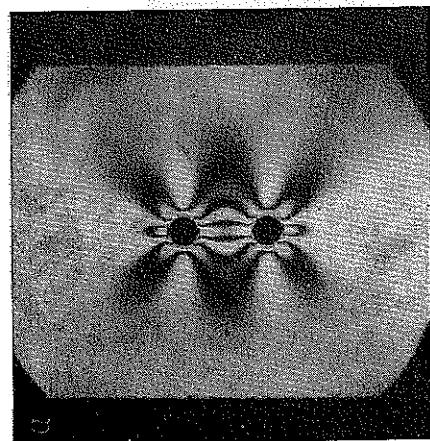
Obrazy izochrom dla poszczególnych przypadków półtrepanacji wielootworowej przedstawione są dla każdego przypadku za pomocą trzech najistotniejszych zdjęć (rys. od 7a do 14c). Na zdjęciach literą *a* oznaczono widok całego obszaru pomiarowego przy ciemnym polu widzenia, literą *b* — w powiększeniu układ izochrom całkowitych, literą *c* — w powiększeniu układ izochrom połówkowych (na zdjęciach tych zaznaczono rzędy izochrom).



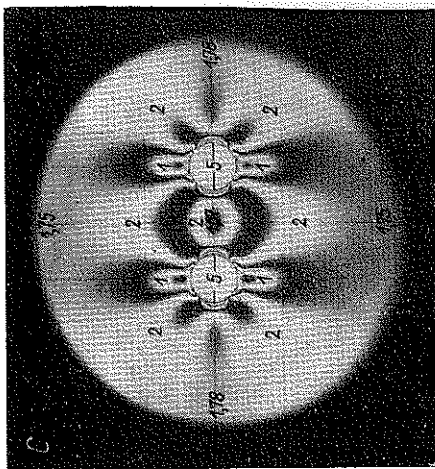
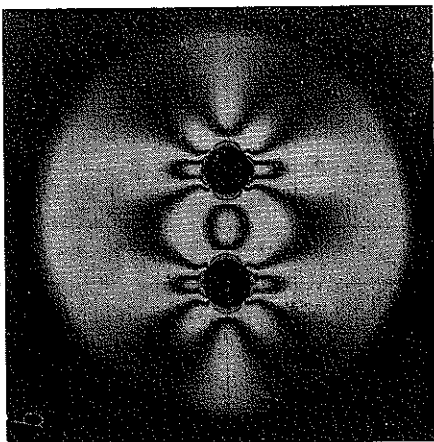
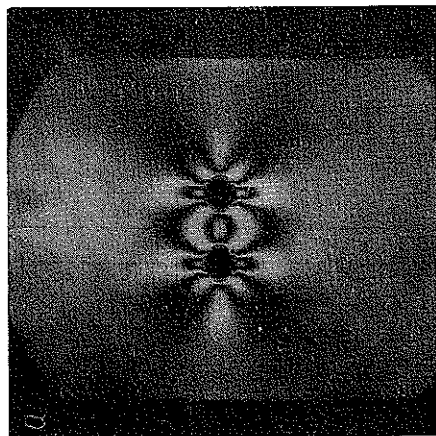
Rys. 7. Zdjęcie fotograficzne izochrom dla układu otworów *A*
 a) cały obszar nierównomiernego rozkładu naprężeń, b) w powiększeniu izochromy całkowitz, c) w powiększeniu izochromy półówkowe.



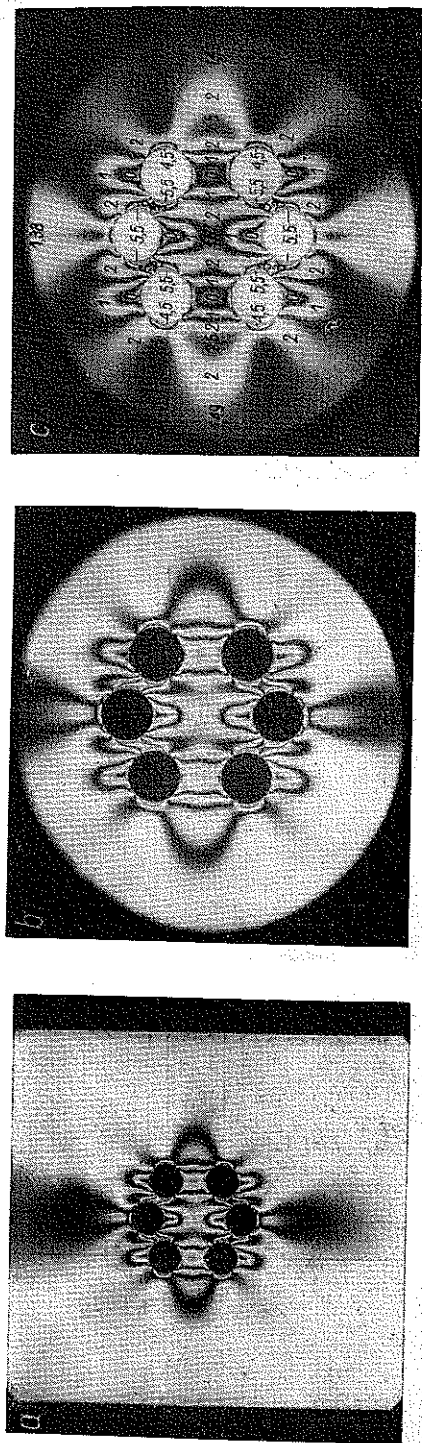
Rys. 8. Zdjęcie fotograficzne izochrom dla układu otworów *B*
 a) cały obszar nierównomiernego rozkładu naprężeń, b) w powiększeniu izochromy całkowitz, c) w powiększeniu izochromy półówkowe.



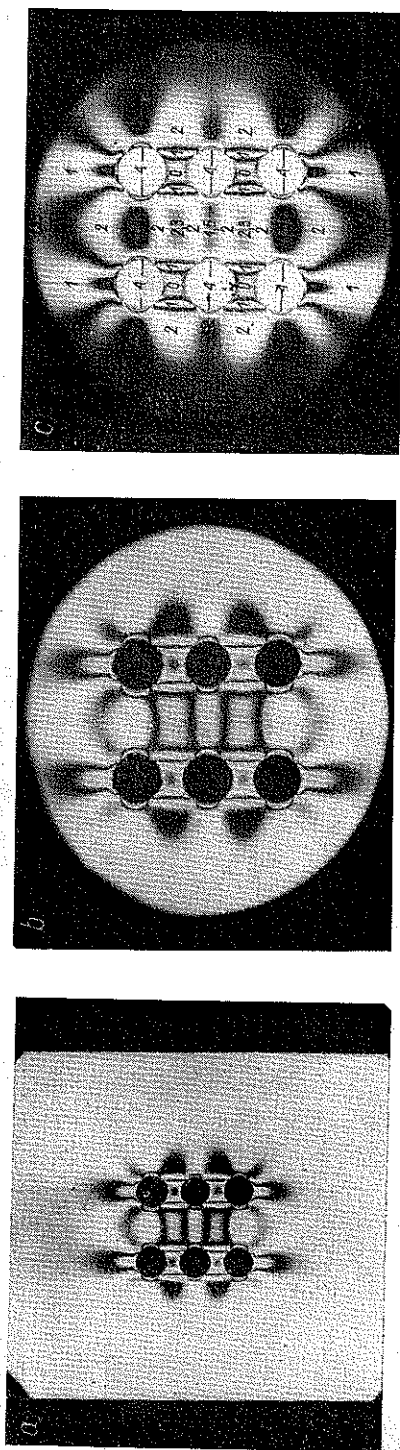
Rys. 9. Zdjęcie fotograficzne izochrom dla układu otworów C
 a) cały obszar nierównomiernego rozkładu naprężeń, b) w powiększeniu izochromy całkowite, c) w powiększeniu izochromy połówkowe



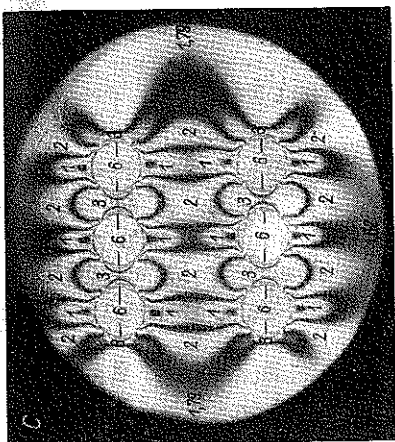
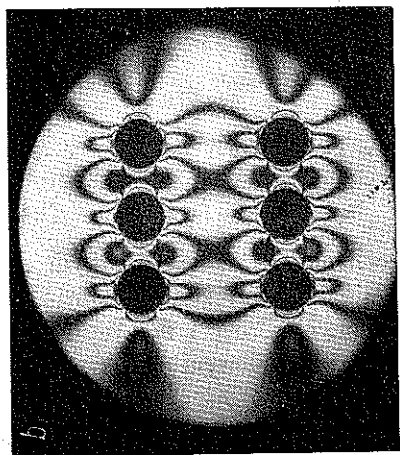
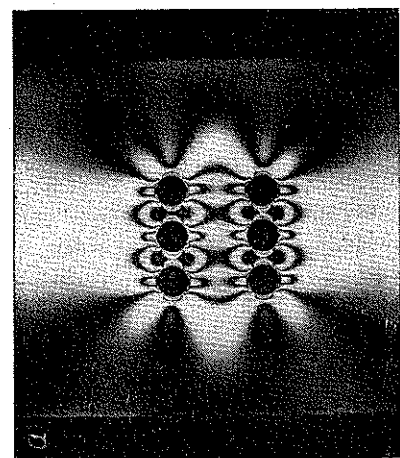
Rys. 10. Zdjęcie fotograficzne izochrom dla układu otworów D
 a) cały obszar nierównomiernego rozkładu naprężeń, b) w powiększeniu izochromy całkowite, c) w powiększeniu izochromy połówkowe



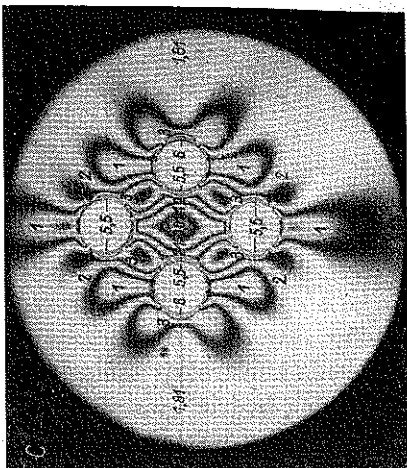
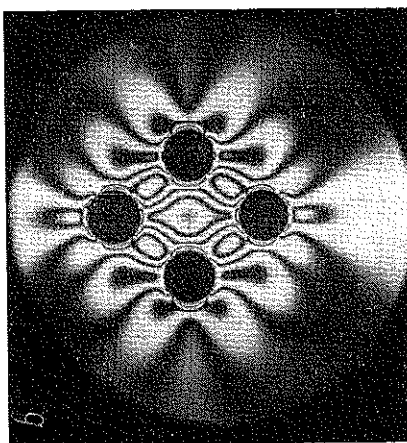
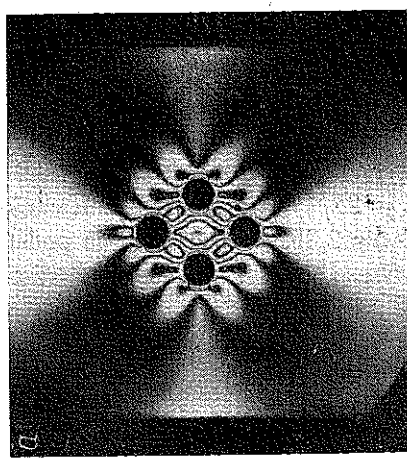
Rys. 11. Zdjęcie fotograficzne izochrom dla układu otworów *E*
 a) cały obszar nierównomiernego rozkładu naprężeń, b) w powiększeniu izochromy całkowite, c) w powiększeniu izochromy półówkowe



Rys. 12. Zdjęcie fotograficzne izochrom dla układu otworów *F*
 a) cały obszar nierównomiernego rozkładu naprężeń, b) w powiększeniu izochromy całkowite, c) w powiększeniu izochromy półówkowe



Rys. 13. Zdjęcie fotograficzne izochrom dla układu otworów G
 a) cały obszar nierównomiernego rozkładu naprężeń, b) w powiększeniu izochromy całkowite, c) w powiększeniu izochromy połówkowe



Rys. 14. Zdjęcie fotograficzne izochrom dla układu otworów H
 a) cały obszar nierównomiernego rozkładu naprężeń, b) w powiększeniu izochromy całkowite, c) w powiększeniu izochromy połówkowe

Wykonane badania elastoptyczne umożliwiły wyjaśnienie sprawy rozkładu naprężeń dla rozpatrywanych układów otworów.

Obserwacje układów izochrom wyraźnie potwierdzają lokalny charakter zaburzeń pola naprężeń, wywołanych zabiegami półtrepanacji wielootworowej.

6. Spiętrzenie naprężeń wywołane nawiercaniem

Otrzymane wyniki badań elastoptycznych umożliwiają analizę spiętrzenia naprężeń, wywołanego zabiegiem półtrepanacyjnym i określenie wartości współczynników α_{ko} i α_{kn} , charakteryzujących spiętrzenie naprężeń dla przyjętych układów otworów. Dzięki temu uzyskujemy właściwe dane do oceny stopnia osłabienia konstrukcji zabiegiem półtrepanacji wielootworowej. Współczynniki te można będzie uważać za dodatkowe, obok ψ , kryteria określające poszczególne odmiany półtrepanacji wielootworowej.

Wprowadzamy następujące współczynniki charakteryzujące spiętrzenie naprężeń:

$$(6.1) \quad \alpha_{ko} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{no}} = \frac{m_{max}}{m_{no}}$$

oraz

$$(6.2) \quad \alpha_{kn} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nn}} = \frac{m_{max}}{m_{nn}},$$

gdzie σ_{max} i m_{max} oznaczają naprężenie i rząd izochromy w rozpatrywanym punkcie obszaru spiętrzenia naprężeń, σ_{no} i m_{no} nominalne naprężenie i nominalny rząd izochromy w osłabionym przekroju płaskownika, σ_{nn} i m_{nn} nominalne naprężenie i nominalny rząd izochromy w nieosłabionym przekroju płaskownika.

Dane uzyskane z badań elastoptycznych oraz obliczone na ich podstawie omówione wyżej współczynniki podane są w tablicy 5. Dla niektórych punktów modelu wyznaczono rzędy izochrom z dokładnością do jednej setnej rzędu izochromy metodą kompensacji TARDY'EGO.

Obecnie porównamy otrzymane wartości współczynników spiętrzenia naprężeń z wartościami określonymi na podstawie rozważań teoretycznych, [5] i [8].

W przypadku *C* stosunek λ odległości między otworami do średnicy otworu wynosi $\lambda = 25/8 = 3,13$. Doświadczalnie określona wartość współczynnika α_{kn} jest równa 2,86, podczas gdy na podstawie rozwiązania teoretycznego wartość α_{kt} wynosi 2,83. Procentowa różnica między $\alpha_{kn} - \alpha_{kt}$ w odniesieniu do α_{kt} wynosi 1,06 %.

W przypadku *D* dla $\lambda = 20/8 = 2,5$ doświadczalnie wyznaczony współczynnik α_{kn} jest równy 2,86, zaś teoretycznie otrzymuje się w punkcie 1 (rys. 1) wartość $\alpha_{kt} = 3,04$, zaś w punkcie 2 $\alpha_{kt} = 3,01$. Procentowe różnice obliczone jak w przypadku *C* wynoszą — 5,9 i — 5,0 %.

Tablica 5

Układ	Nr punktu	Rząd izochromy			$a_{ko} = \frac{m_{max}}{m_{no}}$	$a_{kn} = \frac{m_{max}}{m_{nn}}$	a_{kt}	$\frac{a_{kn} - a_{kt}}{a_{kt}} \cdot 100$ (%)
		w punkcie	nominalny					
			w prze- kroju nieosłab.	w prze- kroju osłab.				
		m_{max}	m_{nn}	m_{no}				
A	1	4	1,35	1,61	2,48	2,96	—	—
	2	4	1,35	1,61	2,48	2,96	—	—
B	1	4	1,37	1,64	2,44	2,92	—	—
	2	4	1,37	1,64	2,44	2,92	—	—
C	1	5	1,75	1,91	2,62	2,86	2,83	1,1
D	1	5	1,75	2,09	2,39	2,86	3,04	-5,9
	2	5	1,75	2,09	2,39	2,86	3,01	5,0
E	1	4	1,35	1,61	2,48	2,96	—	—
	2	4	1,35	1,61	2,48	2,96	—	—
	3	4	1,35	1,61	2,48	2,96	—	—
	4	4	1,35	1,61	2,48	2,96	—	—
F	1	5,5	1,38	1,50	3,67	3,99	—	—
	2	4,5	1,38	1,65	2,73	3,26	—	—
	3	5,5	1,38	1,65	3,34	3,99	—	—
G	1	6	1,62	2,16	2,78	3,70	—	—
	2	6	1,62	2,16	2,78	3,70	—	—
	3	6	1,62	2,16	2,78	3,70	—	—
H	1	5,5	1,66	1,81	3,04	3,32	—	—
	2	6	1,66	1,98	3,03	3,62	—	—
	3	5,5	1,66	1,98	2,78	3,32	—	—

Dla innych układów otworów analogiczne porównania nie zostały wykonane ze względów omówionych szczegółowo w p. 3.

7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań tensometrycznych i elastoptycznych można wysnuć wnioski dotyczące stosowania półtrepanacji wielotworowej do badań stanów naprężenia w elementach konstrukcyjnych w przypadku jednoosiowego stanu naprężenia oraz dotyczące spiętrzenia naprężeń, wywołanego rozpatrywanymi układami otworów.

1. Z przedstawionego na rys. 1 zestawienia porównawczego wartości współczynnika czułości ψ oraz tablicy 2 wynika, że w zależności od układu otworów obszar pracy czujnika pomiarowego może zostać odciążony, $\psi < 0$, lub przeciążony, $\psi > 0$, zabiegiem półtrepanacji wielootworowej. Bardziej pożądane jest zjawisko odciążenia, które wyklucza wystąpienie odkształceń plastycznych w obszarze pomiarowym czujnika. Odciążenie występuje w przypadku układów C, F, G, H, I i J . Biorąc pod uwagę wartości bezwzględne współczynnika czułości najbardziej efektywne są układy B, C, E, I i J , dla których wartość bezwzględna ψ przekracza 0,5.

2. Ze względu na prostotę wykonania badania (mała liczba nawierceń), przy równocześnie dość wysokiej wartości współczynnika ψ , korzystne wydaje się zastosowanie dwuotworowego układu pomiarowego typu C (I i J). W celu zbadania wpływu parametrów układu pomiarowego na współczynnik czułości przeprowadzono odpowiednią analizę wymiarową zagadnienia. Analiza ta doprowadziła do wprowadzenia bezwymiarowego parametru $\delta = lb/d^2$ związanego z ψ doświadczalnie wyznaczoną zależnością o charakterze liniowym

$$\psi = -1 + 0,121 \frac{lb}{d^2}$$

Otrzymana zależność umożliwia obliczenie współczynnika ψ dla różnych parametrów d, b i l układu pomiarowego. Porównanie wyniku uzyskanego w pracy [6] z wyznaczonym w niniejszej pracy powyższym wzorem empirycznym wykazało dobrą zgodność.

3. Z rysunku 5a przedstawiającego zależność między ψ a δ widać, że wartość bezwzględna współczynnika czułości rośnie ze wzrostem średnicy d otworów odciążających oraz zmniejszeniem rozstawu b tych otworów i zmniejszeniem długości l bazy czujnika pomiarowego. Zależność pomiędzy wartością ψ i d dla różnych długości l bazy czujnika przedstawiono na rys. 5b.

4. W dążności do zwiększenia czułości układu pomiarowego i uproszczenia sprawy kompensacji zastosowano układ samokompensacyjny I (rys. 1).

Dla układu tego otrzymano współczynnik czułości $\psi = 0,561$. Zwiększenie wartości współczynnika czułości w układzie I w porównaniu z układem C wynosi 6%. Główną zaletą tego układu w porównaniu z układami z jednym czujnikiem czynnym jest wygodniejsza kompensacja termiczna. Stosując ten układ należy czujnik usytuowany wzdłuż osi łączącej otwory naklejać na spódzie.

5. W oparciu o przeprowadzone badania elastooptyczne określono charakter pól naprężeń w półtrepanowanych wielootworowo elementach płaskich osiowo rozciąganych. Wyznaczono współczynniki kształtu dla rozpatrywanych układów otworów (tablica 5). Największe spiętrzenie naprężeń daje układ F ($a_{kn} = 3,99$). W przypadku dwóch otworów w układzie C i D otrzymano $a_{kn} = 2,86$. Porównanie ostatniej wartości z wartościami uzyskanymi w pracy LINGA, [5],

wykazało, że maksymalna różnica między tymi wartościami nie przekracza 6% wartości, która została wyznaczona teoretycznie, co należy uznać za zadowalające.

W literaturze przedmiotowej z zakresu spiętrzenia naprężeń nie spotkano wartości współczynników kształtu dla większości zbadanych układów otworów. Uważamy, że otrzymane wyniki można uogólnić na wszystkie przypadki o takich samych stosunkach wymiarów elementu, otworów i ich wzajemnych odległości.

6. O ile chodzi o zagadnienie, czy wywołane zabiegiem półtrepanacji wielotworowej spiętrzenie naprężeń nie jest niebezpieczne dla konstrukcji, należy wziąć pod uwagę to, że metodę tę stosować będziemy przede wszystkim do pomiaru odkształceń w przypadku obciążeń nieusuwalnych. Zasadniczym przypadkiem takiego obciążenia jest ciężar własny konstrukcji będący zawsze tylko częścią całkowitego obciążenia, na które składa się jeszcze usuwalne obciążenie użytkowe.

Zabieg półtrepanacji wielotworowej stosować będziemy z zasady tylko przy obciążeniu nieusuwalnym. W przypadku układu otworów C lub I, lub J, powstanie spiętrzenie naprężeń o współczynniku $\alpha_{km} = 2,86$ (tablica 5), czyli jeżeli obciążenie nieusuwalne stanowiłoby 0,35 obciążenia całkowitego (co jest przypadkiem zupełnie realnym), to wówczas półtrepanacja doprowadziłaby jedynie do powstania lokalnych naprężeń o wartości równej naprężeniom występującym w całym przekroju pod wpływem całkowitego obciążenia (które konstrukcja przenosiła przed zdjęciem części usuwalnej). Jak widać, w takim przypadku nawet lokalnie nie zmniejszamy współczynnika pewności badanej konstrukcji.

Literatura cytowana w tekście

- [1] Z. ORŁOŚ, *Pomiary naprężeń w budowie maszyn*, PWT Warszawa 1956.
- [2] Z. ORŁOŚ, Z. DYLAĞ, *Pomiar naprężeń metodą miejscowego odciążenia*, Biul. WAT, 4 (81), 1958.
- [3] Z. ORŁOŚ, Z. DYLAĞ, *Półtrepanacyjna porównawcza metoda pomiaru naprężeń*, Rozpr. inżyn., 3, 7 (1959).
- [4] Z. ORŁOŚ, *Półtrepanacyjne metody pomiarów naprężeń*, Biul. WAT, 5 (88), 1959.
- [5] C. B. LING, *On the Stresses in a Plate Containing Two Circular Holes*, J. appl. Physics, 1, 19 (1948).
- [6] А. М. ПЕНКОВ, А. С. БОНДАРЧУК, В. А. БОРОДАВКО, *Метод частичной разгрузки для определения напряжений от собственного веса в элементах строительных конструкций*, Иссл. по вопросам устойчив. и прочн., АН УССР, Киев 1956.
- [7] R. C. J. HOWLAND, *Stress in a Plate Containing an Infinite Row of Holes*, Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A., vol. 148, 1935.
- [8] Г. Н. САВИН, *Концентрация напряжений около отверстий*, Гостехлит, Москва 1951.
- [9] GLEEN MURPHY, *Similitude in Engineering*, New York 1950.

Резюме

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУТРЕПАНАЦИИ СО МНОГИМИ ОТВЕРСТИЯМИ В СЛУЧАЕ ОДНООСНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

В работе обсуждается применение полутрепанации со многими отверстиями для исследования одноосного напряженного состояния. Анализ основывается на тензометрических и фотоупругих исследованиях растягиваемой полосы с различным расположением отверстий. Кроме того для интерпретации результатов применяется размерный анализ.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие заключения:

В зависимости от расположения отверстий можно получить положительные или отрицательные коэффициенты чувствительности ψ . В последнем случае область, в которой проводится измерение, разгружается, что является более выгодным, так как исключает возникновение в этой области пластических деформации.

В результате тензометрических исследований было выбрано расположение, при котором значения коэффициента чувствительности ψ являются большими. Проведенные измерения в случае двух отверстий разгрузки и соответствующий размерный анализ параметров расположения датчиков позволили определить зависимость между коэффициентами чувствительности ψ и диаметром отверстий d , а также расстоянием между отверстиями b и длиной l измерительной базы. Эта зависимость имеет вид:

$$\psi = -1 + 0,121 \frac{lb}{d^2}.$$

В исследованиях применяется также самокомпенсирующая система измерительных датчиков, проявляющая увеличенную чувствительность и лучшую компенсацию по сравнению с системой с одним датчиком.

Проводятся также фотоупругие исследования распределения напряжений в полосе с отверстиями и определяются коэффициенты концентрации. Эти коэффициенты в случае двух отверстий сравниваются со значением коэффициентов, определенных на основании теоретического решения Линга.

Полученные результаты дают возможность практической реализации полутрепанации со многими отверстиями.

Summary

ANALYSIS OF APPLICATION OF THE MULTI-HOLE SEMI-TREPANATION METHOD IN THE CASE OF ONE-DIRECTIONAL STRESS

The possibility of application of the multi-hole semi-trepanation method to the investigation of one-directional states of stress is analyzed. The analysis is based on strain-gauge and photoelastic tests of stretched plate strips with

holes arranged in various ways. For the interpretation of the results the dimensional analysis is used.

On the basis of the investigations the following conclusions can be drawn.

Depending on the arrangement of the holes positive or negative coefficients sensitivity can be obtained. In the latter case the region, in which the measurement is done is unloaded, which is more advantageous, the appearance of plastic strains in this region being excluded.

As a result of strain gauge tests hole arrangements showing higher values of the sensitivity coefficients ψ are indicated. In the case of two unloading holes the measurement results and an appropriate dimensional analysis of the parameters of the system of strain gauges enabled the determination of the relation between the sensitivity coefficient ψ and the hole diameter d , the distance between the holes b and the length l of the measurement base. This relation has the form

$$\psi = -1 + 0,121 \frac{lb}{d^2}.$$

A self-compensating system of strain gauges showing better sensitivity and better compensation system was also used in the investigation.

Also photoelastic investigations of stress distribution in plate strips with holes were done, the coefficients of form being determined. In the case of two holes these coefficients are compared with those determined on the basis of the theoretical solution by LING.

The results obtained enable practical application of the multi-hole semi-trepanation method.

Praca została złożona w Redakcji dnia 27 maja 1960 r.