

ZBIGNIEW ORŁOŚ I ZDZISŁAW DYLAĞ

PÓLTREPANACYJNA PORÓWNAWCZA METODA  
POMIARU NAPRĘŻEŃ

ROZPRAWY  
INŻYNIERSKIE  
CXXIX

## SPIS TREŚCI

1. Geneza metody	339
2. Podstawy teoretyczne	341
3. Rozbieżności między wynikami teoretycznymi a praktyką pomiaru	346
4. Próby wzorcujące	347
4.1. Badania wzorcujące na płaskownikach stalowych	348
4.2. Badania wzorcujące na próbkach żeliwnych	349
4.3. Badania wzorcujące na próbkach wykonanych z gazobetonu	354
5. Badania wpływu głębokości nawiercenia	356

## 1. Geneza metody

Współczesna technika eksperymentalnej analizy naprężeń dysponuje wieloma opracowanymi i dobrze uzasadnionymi metodami wyznaczania naprężeń. Metody te rozwinęły się w związku z koniecznością doświadczalnej weryfikacji spełnienia wymaganych od konstrukcji postulatów wytrzymałości. Dobór właściwej metody pomiaru naprężeń wynika ze specyficznych warunków zagadnienia. Uwzględnienie tych warunków wpływa istotnie na użytą metodę badań w tym sensie, że z ogółu metod wybieramy najbardziej dogodną w danych warunkach, dochodząc często do nowych i nietypowych sposobów eksperymentowania.

Przedstawiona w niniejszej pracy metoda wyznaczania naprężeń została opracowana w celu stworzenia możliwości badania stanu naprężenia w gotowych elementach konstrukcyjnych, obciążonych statycznie określonym układem sił zewnętrznych lub wewnętrznych. Zasadniczym postulatem było dokonywanie pomiaru na elemencie obciążonym bez możliwości uprzedniego określenia stanu odkształcenia elementu nieobciążonego. Z powyższego względu odpadały konwencjonalne metody tensometrii, w których punktem wyjściowym jest pomiar na powierzchni nieobciążonego elementu.

Dodatkowo z góry przyjęto założenie, że niewielkie ubytki spowodowane badaniem materiału nie osłabiają w istotny sposób elementu i całej związanej z nim konstrukcji. Założenie to umożliwiło opracowanie pewnej wersji półtrepanacyjnej metody pomiarów naprężeń. Wersję tę zastosowano do pomiaru na konkretnym obiekcie w postaci obudowy żeliwnej tunelu metra. Ze względu na charakterystyczny kształt tubingu żeliwnego, który tworzy słabo zakrzywiona płyta wzmocniona podłużnymi i poprzecznymi żebrami, opracowano dwa sposoby pomiaru: jeden na wewnętrznej powierzchni płyty, drugi na krawędzi żebra wewnętrznego.

Po wykonaniu szeregu wstępnych badań laboratoryjnych pierwszy ze sposobów zweryfikowano na doświadczalnym odcinku tunelu metra, drugi zaś na tunelu szlakowym, [7]. Przedmiotem pracy jest omówienie pierw-

szego z opracowanych sposobów pomiarów naprężeń, który można zastosować również do elementów wykonanych ze stali, metali kolorowych i ich stopów i innych materiałów konstrukcyjnych, jak betony, masy plastyczne itp. Metoda ta jest ideowo związana z podanym przez Mathara w 1932 r. opisem pomiaru naprężeń własnych w stalowych dźwigarach za pomocą nawiercania otworu, [1], [6]. Mathar wyznaczał naprężenia na podstawie wartości przemieszczenia punktu powierzchni badanego elementu, przy czym punkt znajdował się w pobliżu brzegu wierconego w materiale otworu. Mathar rozwinął metodę do badania jednoosiowego stanu naprężenia przy znanym kierunku głównym posługując się przy tym doświadczalnie wyznaczanymi krzywymi dla wzorców przy danej średnicy otworu i odległości punktu ruchomego od osi otworu. Znaczną niedogodność w metodzie Mathara przedstawiał zastosowany przez niego układ pomiarowy w postaci tensometru mechanicznego połączonego z wiertarką, której praca powodowała wstrząsy niekorzystnie wpływające na delikatny przyrząd, co prowadziło do powstawania niekontrolowanych błędów przypadkowych pomiaru. W 1936 r. Mesmer uogólnił teoretyczne założenia metody nawiercania na przypadek dwuosiowego stanu naprężenia o znanych kierunkach głównych w oparciu o pomiar przemieszczeń dwóch punktów, [2].

Wprowadzenie czujników elektrooporowych do pewnego stopnia udoskonaliło technikę pomiaru naprężeń metodą nawiercania. Prace w kierunku adaptacji metody Mathara do pomiarów tensometrami oporowymi prowadzili też W. Soete i R. Vancrombrugge oraz C. Ripabelli. Wyniki otrzymane przez wymienionych autorów zostały opublikowane w 1950 r., [3] i [4]. W pracach tych przedmiotem badań był założony równomierny stan naprężenia w płycie o znacznych wymiarach przy zastosowaniu pojedynczego otworu. Dalszy postęp w tej dziedzinie wykazuje praca R. A. Kelsey'a ogłoszona w 1956 r., [5], w której autor przeprowadza analizę możliwości rozszerzania metody nawiercania na przypadki nierównomiernego stanu naprężenia.

Przedstawione poniżej ujęcie metody nawiercania dotyczy badań materiałów liniowo sprężystych, ponadto jest próbą uogólnienia tej metody na badania stanu naprężenie w elementach z materiałów konstrukcyjnych nieliniowo sprężystych (żeliwo, beton). Ze względu na nieliniową charakterystykę sprężystą tych materiałów prace wstępne ograniczyły się do rozwinięcia zagadnienia pomiaru w jednoosiowym stanie naprężenia. W celu otrzymania wytycznych optymalnego doboru technicznych warunków pomiaru przeprowadzono teoretyczną analizę opartą na związkach zachodzących w zakresie liniowo sprężystym dla tarczy nieograniczonej i dlatego wyprowadzone tu relacje mają charakter przybliżony dla podanego zakresu badań.

## 2. Podstawy teoretyczne

W punkcie tym omówimy zasadnicze założenia teoretyczne metody półtrepanacyjnej i pewne wynikające z nich wnioski praktyczne, ważne dla zastosowanej techniki pomiaru.

Punktem wyjścia metody nawiercania jest zjawisko zaburzenia równomiernego rozkładu naprężeń i odkształceń, występujące w tarczy poddanej rozciąganiu po wywierceniu w niej otworu. Zjawisko to można przedstawić analitycznie posługując się podanym przez Kirscha rozwiązaniem zagadnienia stanu naprężenia w tarczy nieograniczonej, zaopatrzonej w okrągły otwór. W miejscach znajdujących się na tarczy w znacznych odległościach od otworu przyjmuje się jednorodny jednoosiowy stan naprężenia. W płaskim biegunowym układzie współrzędnych  $r$  i  $\varphi$  odpowiednie składowe stanu naprężenia  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\varphi$  i  $\tau_{r\varphi}$  (rys. 1) wyrażają się następującymi wzorami, wprowadzonymi przez Kirscha:

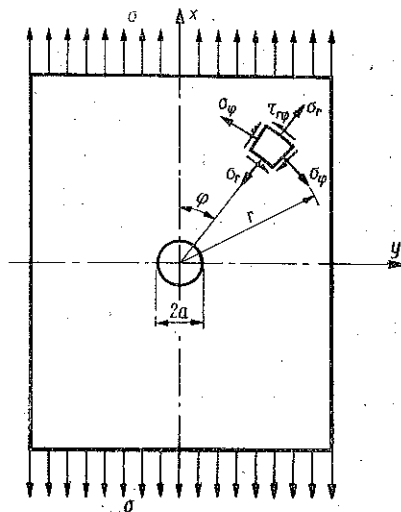
$$(2.1) \quad \sigma_r = \frac{\sigma}{2} \left[ 1 - \frac{a^2}{r^2} + \left( 1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right],$$

$$(2.2) \quad \sigma_\varphi = \frac{\sigma}{2} \left[ 1 + \frac{a^2}{r^2} - \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right],$$

$$(2.3) \quad \tau_{r\varphi} = \frac{\sigma}{2} \left( -1 - \frac{2a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\varphi,$$

gdzie  $\sigma$  oznacza naprężenie główne jednoosiowego stanu naprężenia w punktach dostatecznie oddalonych od otworu oraz  $a$  promień otworu.

Na podstawie wzorów (2.1) - (2.3) można stwierdzić fakt spiętrzenia naprężeń w obszarze bezpośrednio sąsiadującym z otworem tarczy. Wzrost wartości składowych stanu naprężenia i odkształcenia w okolicy otworu wykorzystuje się w półtrepanacyjnej metodzie pomiaru naprężeń. Jeżeli na początkowo nieuszkodzonej powierzchni napiętej tarczy nakleimy czujnik elektrooporowy i następnie wywiercimy w jego sąsiedztwie niewielki otworek, to w wyniku miejscowej deformacji tarczy czujnik wykaże pewien średni przyrost odkształcenia w kierunku wyznaczonej bazy pomiarowej. Wyznaczony średni przyrost odkształcenia jednostkowego wyraża



Rys. 1. Naprężenia  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\varphi$  i  $\tau_{r\varphi}$  w biegunowym układzie współrzędnych

różnicę odkształceń odpowiadających dwóm stanom naprężeń: niejednorodnemu panującemu w sąsiedztwie otworu i jednorodnemu panującemu w nieuszkodzonej tarczy. Przy określonym położeniu czujnika względem otworu, znanym kierunku głównym stanu naprężenia w tarczy oraz ustalonych charakterystycznych parametrach czujnika można z wartości wykazanego przyrostu odkształcenia określić wartość naprężenia głównego w badanej tarczy.

W celu otrzymania dogodnych zależności wyrazimy składowe naprężenia normalnych i odkształceń liniowych w prostokątnym układzie współrzędnych  $x$  i  $y$  (rys. 1). Korzystając z właściwości biegunowego układu współrzędnych zastosujemy do wyznaczenia składowych naprężeń  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$  następujące wzory transformacyjne:

$$(2.4) \quad \sigma_x = \frac{\sigma_r + \sigma_\varphi}{2} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{2} \cos 2\varphi - \tau_{r\varphi} \sin 2\varphi,$$

$$(2.5) \quad \sigma_y = \frac{\sigma_r + \sigma_\varphi}{2} - \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{2} \cos 2\varphi + \tau_{r\varphi} \sin 2\varphi.$$

Po podstawieniu (2.1) - (2.3) do wzorów (2.4) i (2.5) i wykonaniu prostych przekształceń otrzymujemy

$$(2.6) \quad \sigma_x = \frac{\sigma}{2} \left[ 2 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} - \frac{3a^2}{r^2} \cos 2\varphi - \left( \frac{4a^2}{r^2} - \frac{6a^4}{r^4} \right) \cos^2 2\varphi \right],$$

$$(2.7) \quad \sigma_y = \frac{\sigma}{2} \left[ -\frac{2a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{a^2}{r^2} \cos 2\varphi + \left( \frac{4a^2}{r^2} - \frac{6a^4}{r^4} \right) \cos^2 2\varphi \right].$$

Wartości jednostkowych odkształceń liniowych  $\varepsilon_x$  i  $\varepsilon_y$  w kierunkach  $x$  i  $y$  wyznaczamy ze wzorów wynikających z prawa Hooke'a w płaskim stanie naprężenia

$$(2.8) \quad \varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu\sigma_y),$$

$$(2.9) \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu\sigma_x).$$

W dalszym ciągu interesować się będziemy odkształceniem  $\varepsilon_x$ , które na podstawie związków (2.6) - (2.8) można wyrazić w postaci:

$$(2.10) \quad \varepsilon_x = \frac{\sigma}{2E} \left[ 2 + (1+\nu) \frac{2a^2}{r^2} - (1+\nu) \frac{3a^4}{r^4} - (3-\nu) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\varphi - (1+\nu) \left( \frac{4a^2}{r^2} - \frac{6a^4}{r^4} \right) \cos^2 2\varphi \right].$$

Niech  $AB$  (rys. 2) oznacza położenie czujnika oporowego o bazie  $l$  skierowanej równoległe do osi  $x$  pokrywającej się z kierunkiem głównym

badanego jednoosiowego stanu naprężenia. Wyznaczymy średnie odkształcenie liniowe  $\bar{\varepsilon}_x$  bazy  $l$  oddalonej o  $s$  od osi otworu. Z rysunku 2 wynikają następujące związki między współrzędnymi dowolnego punktu na odcinku  $AB$ :

$$(2.11) \quad \cos \varphi = \frac{x}{r}, \quad \sin \varphi = \frac{s}{r},$$

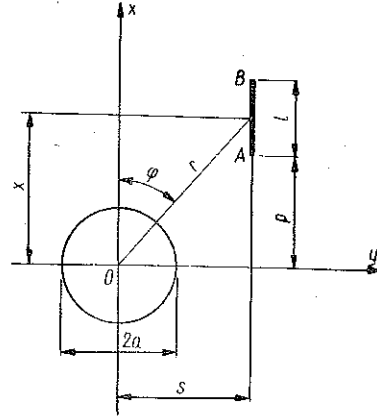
$$r = \sqrt{x^2 + s^2},$$

stąd zaś

$$(2.12) \quad \cos 2\varphi = \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi = \frac{x^2 - s^2}{x^2 + s^2}.$$

Wartość średniego odkształcenia  $\bar{\varepsilon}_x$  określamy wzorem

$$(2.13) \quad \bar{\varepsilon}_x = \frac{1}{l} \int_p^{p+l} \varepsilon_x dx.$$



Rys. 2. Położenie czujnika pomiarowego  $AB$  względem otworu

Po uwzględnieniu we wzorze (2.10) związków (2.11) i (2.12) i podstawieniu uzyskanego wyrażenia na  $\varepsilon_x$  do wzoru (2.13) otrzymujemy

$$(2.14) \quad \bar{\varepsilon}_x = \frac{\sigma}{2El} \int_p^{p+l} \left\{ 2 + 2(1+\nu) \frac{a^2}{x^2 + s^2} - 3(1+\nu) \frac{a^4}{(x^2 + s^2)^2} - \right. \\ \left. - (3-\nu) a^2 \frac{x^2 - s^2}{(x^2 + s^2)^2} - 2(1+\nu) \left[ 2a^2 \frac{(x^2 - s^2)^2}{(x^2 + s^2)^3} - 3a^4 \frac{(x^2 - s^2)^2}{(x^2 + s^2)^4} \right] \right\} dx.$$

Po wyznaczeniu występujących w (2.14) całek uzyskujemy wzór

$$(2.15) \quad \bar{\varepsilon}_x = \left[ \frac{\sigma}{2El} \left\{ 2x + (5+\nu) a^2 \frac{x}{x^2 + s^2} - (1+\nu) a^2 (4s^2 + a^2) \frac{x}{(x^2 + s^2)^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + 4(1+\nu) a^4 s^2 \frac{x}{(x^2 + s^2)^3} \right\} \right]_p^{p+l}.$$

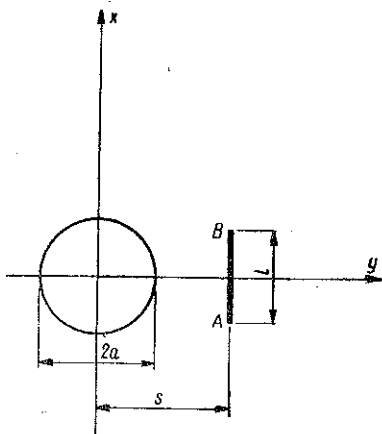
Związek ten możemy napisać w prostej postaci

$$(2.16) \quad \bar{\varepsilon}_x = \varepsilon_x^0 + \Delta \bar{\varepsilon}_x,$$

gdzie  $\varepsilon_x^0 = \sigma/E$  oznacza jednostkowe odkształcenie liniowe tarczy w punktach znacznie oddalonych od otworu,  $\Delta \bar{\varepsilon}_x = \psi \varepsilon_x^0$  mierzony czujnikiem przyrost odkształcenia w sąsiedztwie otworu,  $\psi$  współczynnik określony wzorem

$$(2.17) \quad \psi = \left| \frac{1+\nu}{2} \frac{1}{l} \frac{a^2 x}{x^2 + s^2} \left\{ \frac{5+\nu}{1+\nu} - \frac{4s^2 + a^2}{x^2 + s^2} + \frac{4s^2 a^2}{(x^2 + s^2)^2} \right\} \right|_p^{p+l}.$$

Współczynnik  $\psi$  określa, jaką częstość odkształcenia jednostkowego równomiernego mierzy czujnik elektrooporowy. Współczynnik ten zależy od bazy czujnika  $l$ , współrzędnych  $p$  i  $s$  określających jego położenie i  $a$  promienia otworu. Przeprowadzimy analizę zależności (2.17) w celu zbadania, jaki wpływ wywierają parametry  $l$ ,  $p$  i  $s$  na dokładność pomiaru naprężeń. Rozważymy przy tym dwa zasadnicze przypadki położenia czujnika względem otworu.



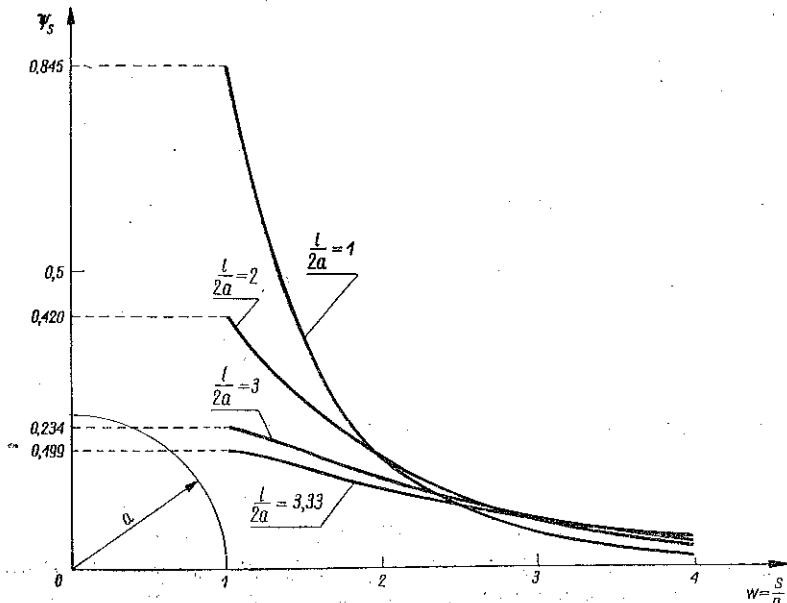
Rys. 3. Czujnik umieszczony symetrycznie względem osi otworu

(a) Czujnik zorientowany równolegle do osi  $x$  i symetrycznie względem osi  $y$ .

W przypadku tym mamy  $p = -l/2$ ,  $s \geq a$  (rys. 3). Podstawiając do wzoru (2.17) granice całkowania  $-l/2$  i  $l/2$  i wprowadzając oznaczenie  $\psi = \psi_s$  otrzymujemy

$$(2.18) \quad \psi_s = \frac{1+\nu}{2} \frac{1}{m^2+w^2} \left[ \frac{5+\nu}{1+\nu} - \frac{1+4w^2}{m^2+w^2} + \frac{4w^2}{(m^2+w^2)^2} \right],$$

gdzie  $w = s/a$  i  $m = l/2a$ .



Rys. 4. Wykres zależności  $\psi_s$  od  $w = S/a$  przy  $l/2a = \text{const}$

Równanie (2.18) przedstawia jednoparametrową rodzinę krzywych. Kilka z tych krzywych przy różnych wartościach stosunku  $l/2a$  przedsta-



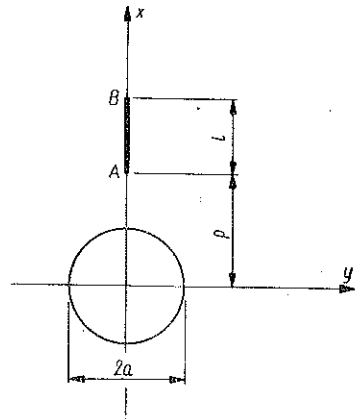
wiono na rys. 4 w układzie współrzędnych o odciętej  $w = s/a$  i rzędnej  $\psi_s$ . Z rysunku widać, że krzywe te ze wzrostem wartości  $s/a$  opadają i zdążają asymptotycznie do osi odciętych. W pobliżu otworu mniejszym wartościom  $l/2a$  odpowiadają większe wartości  $\psi_s$ . Wynika z tego, że większą czułość wyznaczenia naprężenia wykazują czujniki o krótszych bazach. Przy czujnikach tych jednak wzrastają błędy wynikające z niedokładności ustawienia czujnika względem otworu. Błędy te wyraźnie się zmniejszają przy czujnikach o większych bazach w stosunku do średnicy otworu.

(b) Czujnik umieszczony na osi  $x$ .

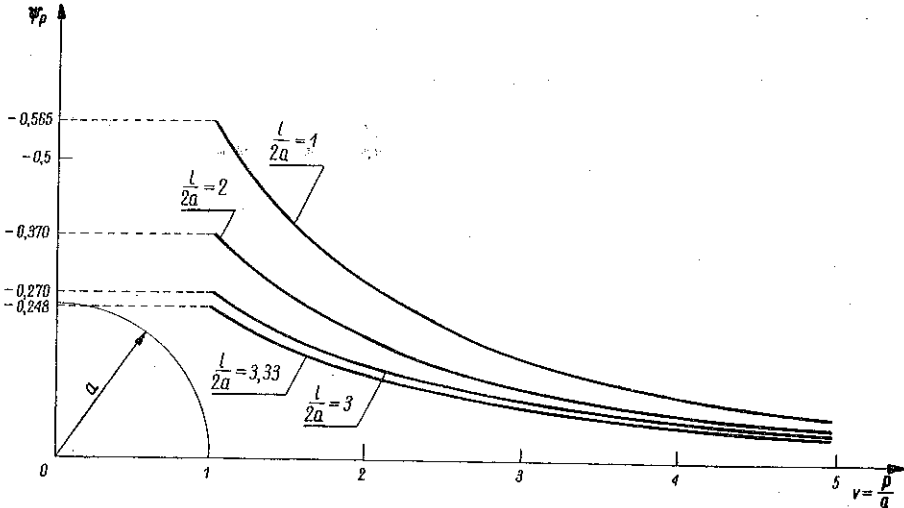
W przypadku czujnika umieszczonego na osi  $x$  należy we wzorze (2.17) przyjąć  $s = 0$  (rys. 5). Po podstawieniu granic całkowania  $p$  i  $p+l$ , po prostych przekształceniach i wprowadzeniu oznaczenia  $\psi = \psi_p$  otrzymujemy

$$(2.19) \quad \psi_p = -\frac{1+v}{2} \frac{1}{(v+2m)v} \left\{ \frac{5+v}{1+v} - \left[ \frac{1}{(v+2m)^2} + \frac{1}{(v+2m)v} + \frac{1}{v^2} \right] \right\},$$

gdzie  $v = p/a$  oraz  $m = l/2a$ .



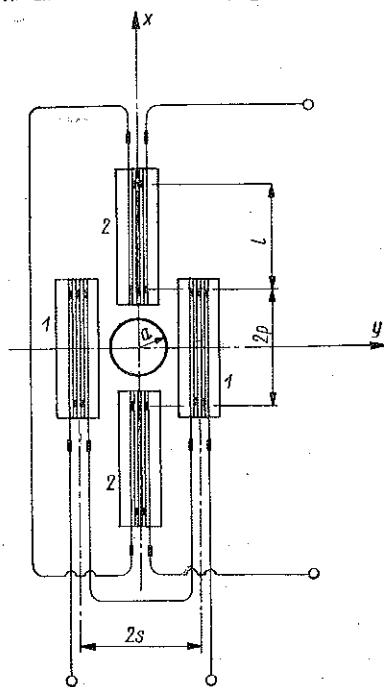
Rys. 5. Czujnik umieszczony wzdłuż osi  $y$



Rys. 6. Wykres zależności współczynnika  $\psi_p$  od  $v = P/a$  przy  $l/2a = \text{const}$

Przedstawione na rys. 6 krzywe stałych wartości stosunku  $l/2a$  przy wzrastających wartościach  $p/a$  dążą asymptotycznie do osi rzędnych. War-

tości  $\psi_p$  są ujemne. Oznacza to, że przy  $\sigma > 0$ , tj. przy rozciąganiu tarczy w kierunku osi  $x$ , po wywierceniu otworu umieszczone w jego sąsiedztwie na osi czujniki oporowe wykazą skrócenia. Stwierdzony wyżej fakt, że współczynniki  $\psi_s$  i  $\psi_p$  mają przeciwne znaki, umożliwia zwiększenie czułości pomiaru przez zastosowanie układu czujników umieszczonych symetrycznie względem otworu, jak na rys. 7. Czujniki 1-1 i 2-2 są odpowiednio połączone szeregowo i włączone w przeciwległe gałęzie mostka pomiarowego. Dzięki takiemu włączeniu uzyskujemy układ samokompensacyjny, w którym przyrząd rejestrujący wskazuje sumę bezwzględnych wartości przyrostów odkształceń o znakach przeciwnych. Jeżeli z pewnych względów nie można zastosować układu czterech czujników, to można użyć dwóch czujników w pozycjach 1-1 przy dodatkowym czujniku kompensacyjnym nalepionym na swobodną od obciążeń płytkę, wykonaną z materiału badanego elementu.



Rys. 7. Cztery czujniki w układzie samokompensacyjnym

### 3. Rozbieżności między wynikami teoretycznymi a praktyką pomiaru

Przytoczone rozważania teoretyczne dają pewne wytyczne odnośnie właściwego wyboru parametrów zastosowanego w pomiarze układu czujników. W rzeczywistym badaniu nie można obejść się bez próby wzorcowania układu pomiarowego. Próba ta może dać wyniki odbiegające od teoretycznych przewidywań. Powodują to m. in. następujące czynniki:

(1) niejednorodność materiału (obce wtrącenia, pory, żużel, różna gęstość i inne właściwości wynikające z procesu technologicznego produkcji badanego obiektu),

(2) nieliniowość fizykalna materiału elementu w granicach danego zakresu naprężeń,

(3) nieznaną wpływ procesów reologicznych zachodzących w materiale elementu poddanego zwykle długotrwałym obciążeniom, zmianom temperatury, wilgotności, ciśnienia itp.

(4) wpływ kleju mocującego i odkształcalności podkładki czujnika,

(5) skończona szerokość czujnika elektrooporowego i niedokładności jego wymiarów w stosunku do nominalnych,

(6) kształt badanego elementu różny od rozpatrywanej tarczy nieograniczonej,

(7) błędy w ustawieniu czujników względem otworu i osi  $x$ ,  $y$ .

Wymienione wyżej ważniejsze czynniki powodują konieczność wykonania cyklu badań wzorcujących na odpowiednio pobranej próbce z elementu przy określonym sposobie obciążenia.

Czujnik elektrooporowy składając się z kilku równoległych odcinków przewodnika, połączonych szeregowo, wykazuje przeciętną wartość odkształceń średnich poszczególnych odcinków drutu. W przypadku liniowej zmienności tych odkształceń dla kolejnych odcinków przewodnika wartość pomierzona podaje odkształcenie średnie, występujące rzeczywiście na podłużnej osi symetrii czujnika. W przypadku nieliniowej zmiany odkształceń w obszarach spiętrzenia, wywołanego nawierceniem, odległość  $s$  (rys. 2 i 3) nie określa ściśle położenia miejsca odpowiadającego odkształceniu wykazanemu tensometrem.

#### 4. Próby wzorcujące

W celu bezpośredniego otrzymania zależności między zmierzonym odkształceniem a wartością naprężenia należy zrealizować próbę porównawczą poddając badany element znanemu stanowi naprężenia. Ponieważ nawiercanie takiej próbki przy podanej w p. 3 kolejności czynności wymagałoby wykonania tylu elementów próbnych, ile wartości naprężeń na wzorcach chcielibyśmy uzyskać, a to pociągałoby za sobą znaczne koszty, przeto w badaniu wzorców stosujemy nieco odrębny sposób postępowania, mianowicie badaną próbkę zaopatrujemy jednym otworem i oklejamy odpowiednio rozmieszczonymi czujnikami, a następnie umieszczamy w maszynie wytrzymałościowej i wywołujemy właściwy stan naprężenia. Podczas badań rzeczywistego elementu nawiercenie wykonuje się przy obciążonym elemencie, a więc pomiarowi podlega przyrost odkształcenia od stanu określonej deformacji wstępnej.

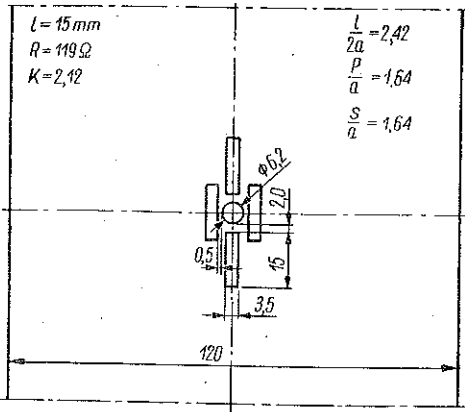
W badanej próbce wzorcowej, poddawanej np. osiowemu ściskaniu mierzy się każdorazowo odkształcenie w odniesieniu do stanu nieobciążonego. Za wartość odkształcenia wzorcującego przyjmuje się zatem różnicę między przyrostem odkształcenia mierzonego w pobliżu otworu a przyrostem odkształcenia wskazanego czujnikami, położonymi z dala od otworu.

W metodzie półtrepanacyjnej zakłada się, że wywołane nawierceniem zaburzenie rozkładu naprężeń w elemencie ma charakter miejscowy i powstała nierównomierność rozkładu naprężeń szybko zanika w miarę oddalania się od otworu. Opierając się na tym założeniu przy badaniu po-

sługujemy się odpowiednio pobraną z elementu próbką poddawaną określonym obciążeniom. Ten sposób postępowania nie wyklucza w poszczególnych przypadkach możliwości wykonywania próby wzorcowania przy użyciu całego elementu jako wzorca.

4.1. Badania wzorcujące na płaskownikach stalowych. W celu sprawdzenia wyprowadzonych wzorów na współczynniki  $\psi_p$  i  $\psi_s$  przeprowadzono badania wzorców na płaskownikach stalowych ze stali węglowej o

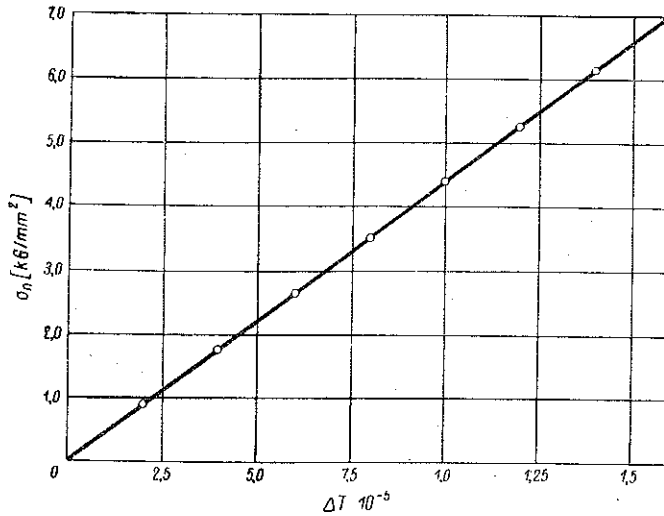
$R_r = 41,3 \text{ kG/mm}^2$  o wymiarach przekroju  $120 \times 10 \text{ mm}$  i długości  $800 \text{ mm}$ .



Rys. 8. Rozmieszczenie czujników elektroopornych na płaskowniku stalowym

W środku płaskowników wykonywano otwory wiertłem o średnicy  $6 \text{ mm}$ . Typowe produkowane w kraju czujniki mają podkładkę papierową o powierzchni stosunkowo dużej w porównaniu z obszarem zajęтым przez układ metalicznych przewodników czujnika. Jest to niedogodne w metodzie nawiercania, ponieważ wy-

maga dość dużego odsunięcia baz pomiarowych od otworu. W badaniach zastosowano specjalnie spreparowane czujniki o podkładce umożliwia-

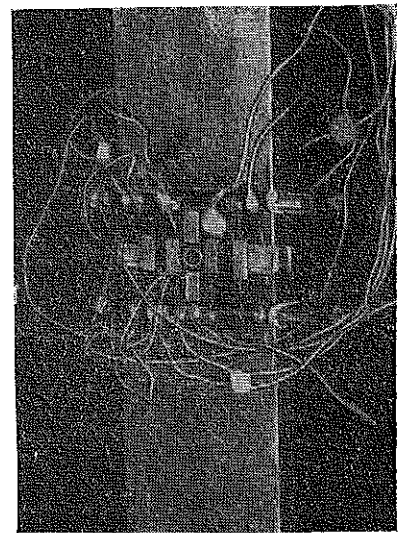


Rys. 9. Wykres zależności  $\sigma_n$  od  $\Delta T T$  dla płaskownika stalowego

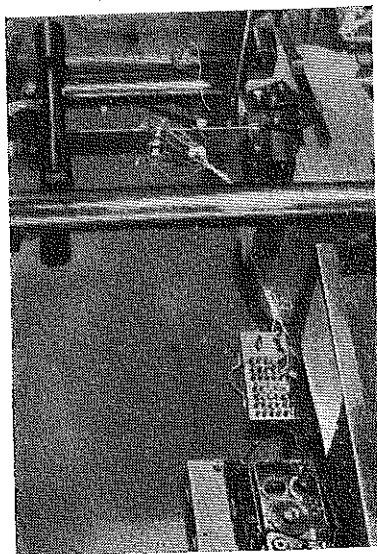
jącej znaczne zbliżenie baz pomiarowych do brzegu otworu. Dla podwyższenia czułości pomiaru zastosowano samokompensacyjny układ

czterech czujników. Rozmieszczenie baz pomiarowych czujników względem otworu i charakterystyczne parametry przedstawiono na rys. 8. Na rysunku tym zaznaczono prostokątami gabarytowe wymiary czynnych odcinków przewodów czujników. Płaskowniki obciążano w maszynie wytrzymałościowej siłą osiową wzrastającą od zera do 30 t odczytując odpowiednie wskazania  $\Delta T$  mostka tensometrycznego. Na rysunku 9 przedstawiono określoną w ten sposób zależność naprężenia nominalnego  $\sigma_n$  od  $\Delta T$  w przedziale od 0 do 7 kG/mm<sup>2</sup>. W tym przedziale przy użyciu mostka tensometrycznego ZKTR o dokładności odczytu 0,005‰ stwierdzono, że zależność powyższa ma charakter liniowy. Powyżej wymienionego zakresu występują odchylenia od liniowego przebiegu zwiększające się w miarę wzrostu naprężenia nominalnego. Odchylenia te spowodowane są w głównej mierze powstającymi w sąsiedztwie otworu odkształceniami plastycznymi. Na podstawie wyprowadzonych poprzednio zależności obliczono współczynnik  $\psi_u$  przyjętego układu czujników jako sumę bezwzględnych wartości współczynników  $\psi_p$  i  $\psi_s$  otrzymując wartość  $\psi_u = 0,453$ . W podanym zakresie naprężeń od 0 do 7 kG/cm<sup>2</sup> rzeczywista wartość tego współczynnika wynosi  $\psi_{urz} = 0,469$ . Różnica między  $\psi_{urz}$  a  $\psi_u$  w odniesieniu do wartości  $\psi_{urz}$  wynosi 3,42%, co z uwagi na przyjęte w analizie teoretycznej założenia upraszczające daje dobre potwierdzenie poprawności otrzymanych poprzednio zależności. Rysunek 10 przedstawia zdjęcie próbki zamocowanej w szczękach maszyny wytrzymałościowej, rys. 11 przedstawia widok aparatury pomiarowej złożonej z zasilacza, mostka tensometrycznego ZKTR i skrzynki rozdzielczej. Na rysunku 12 przedstawiona jest próbka bezpośrednio przed zerwaniem. Widoczne jest przewężenie plastyczne próbki w przekroju osłabionym otworem. Rysunek 13 przedstawia obie części próbki po zerwaniu, które nastąpiło przy sile  $P_{max} = 47$  t.

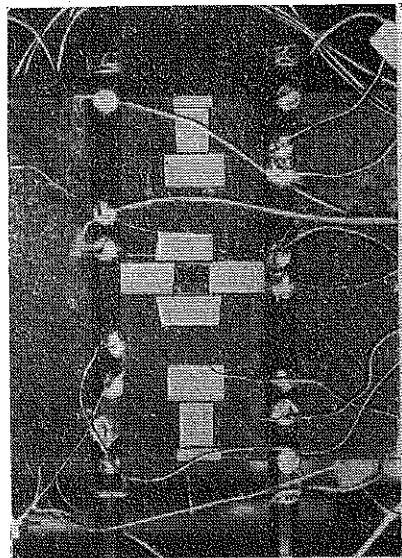
**4.2. Badania wzorcujące na próbkach żeliwnych.** Wzorcowanie próbek żeliwnych przeprowadzono w związku z badaniami pracy obudowy żeliwnej tunelu metro. W celu uzyskania charakterystycznych dla metody półtrepanacyjnej zależności wykonano prostopadłościennne próbki, pobrane z żeliwnych tubingów obudowy. Materiałem tubingów jest żeliwo szare o wytrzymałości doraźnej na rozciąganie  $R_r = 22$  kG/mm<sup>2</sup>. W zakresie naprężeń od 0 do 10 kG/mm<sup>2</sup> przeciętne wartości stałych materiałowych tego żeliwa wynoszą  $E = 0,889 \cdot 10^4$  kG/mm<sup>2</sup> i  $\nu = 0,280$ . Badaną płytkę poddawano dokładnej obróbce w celu zapewnienia równoległości ścian przeciwległych i wzajemnej prostopadłości ścian schodzących się w krawędziach. Po oszlifowaniu próbka posiadała wymiary  $114 \times 144 \times 24$  mm. W tak przygotowanej próbce wywiercono otwór o średnicy  $d = 6$  mm. Oś otworu przechodziła przez środek geometryczny najszerzej ściany prostopadle do jej powierzchni. Na obu najszerzych ścianach naklejono



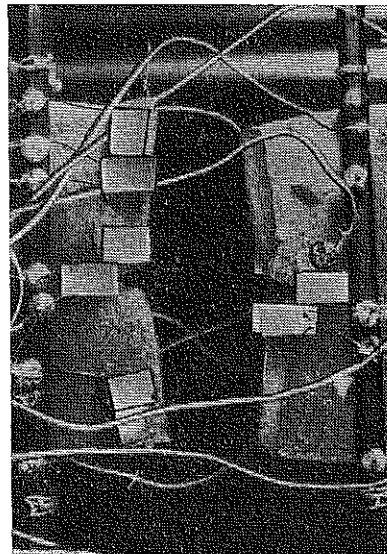
Rys. 10. Badany płaskownik zamocowany w maszynie wytrzymałościowej



Rys. 11. Stanowisko badawcze do próby wzorcowania na płaskowniku

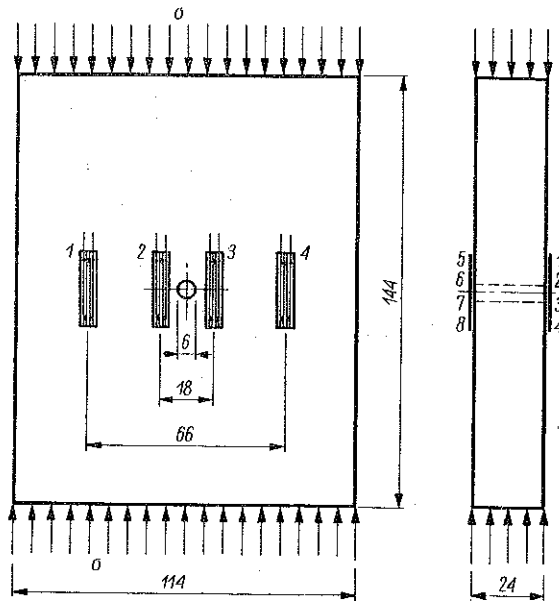


Rys. 12. Płaskownik stalowy bezpośrednio przed zerwaniem



Rys. 13. Płaskownik po zerwaniu

symetrycznie względem otworu 8 czujników o bazie  $l = 20$  mm i nominalnym oporze  $R = 120 \Omega$ , oznaczonych kolejnymi numerami 1, 2, ..., 8 (rys. 14). Odległość  $b$  osi sąsiadujących z otworem czujników 2, 3, 6 i 7 wynosiła 18 mm. Pozostałe czujniki 1, 4, 5 i 8 mierzące równomierne odkształcenie próbki były umieszczone odpowiednio między czujnikami 2, 3, 6 i 7 a krawędziami próbki; odległość ich osi wynosiła 66 mm.



Rys. 14. Układ czujników przy badaniach wzorcujących na próbce żeliwnej

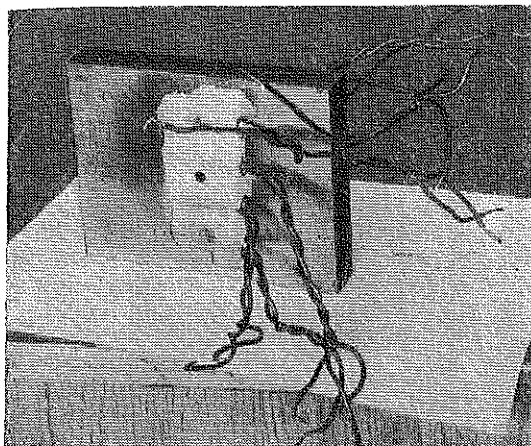
Zastosowanie czterech czujników wewnętrznych i czterech zewnętrznych wynika z konieczności uzyskania wartości średniej przyrostów mierzonych odkształceń i wyeliminowania możliwego wpływu zginania.

Dla uzyskania możliwości wielokrotnego powtórzenia próby na wzorcu przyjęto wartość maksymalnej siły ściskającej  $P = 20\,000$  kG, co przy polu osłabionego przekroju równym  $A = 25,9$  cm<sup>2</sup> daje wartość największego naprężenia ściskającego w tym przekroju

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A_0} = -775 \text{ kG/cm}^2.$$

Badanie wzorcujące przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej firmy Amsler o maksymalnej sile  $P = 50\,000$  kG przy nastawieniu siłomierza na zakres 0-50 000 kG. Pomiarów odkształceń dokonywano mostkiem tensometrycznym ZKTR. Działka potencjometru mostka ma wartość 0,01‰ odkształcenia. Do badań użyto czujniki typu krątowego o stałej  $k = 2,1$ . Zdjęcia na rysunkach 15 i 16 przedstawiają wzorcó-

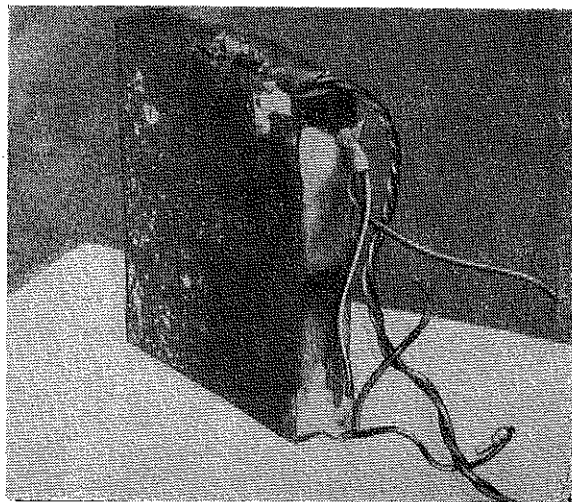
waną próbkę poddaną badaniu oraz element żeliwny z naklejonymi czujnikami kompensacyjnymi. Wyniki serii pomiarów przedstawiono graficznie na rys. 17. W podanym na rysunku układzie współrzędnych oś



Rys. 15. Próbką żeliwna z naklejonymi i zabezpieczonymi czujnikami elektrooporowymi

odciętych odpowiada wyznaczonym przyrostom odkształceń  $\Delta T_r$ , z dala od otworu i  $\Delta T_s$  w pobliżu otworu, oś rzędnych — nominalnym naprężeniami ściskającym  $\sigma$  w osłabionym przekroju. W danym przedziale obciążeń próbki linia zależności  $\sigma = \sigma(\Delta T_r)$ , jak widać na wykresie, mało odbiega od prostej i można wyrównać jej przebieg przyjmując linię prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Linia zależności  $\sigma = \sigma(\Delta T_s)$  jest krzywą łagodnie wygiętą wypukłością w dół. Na

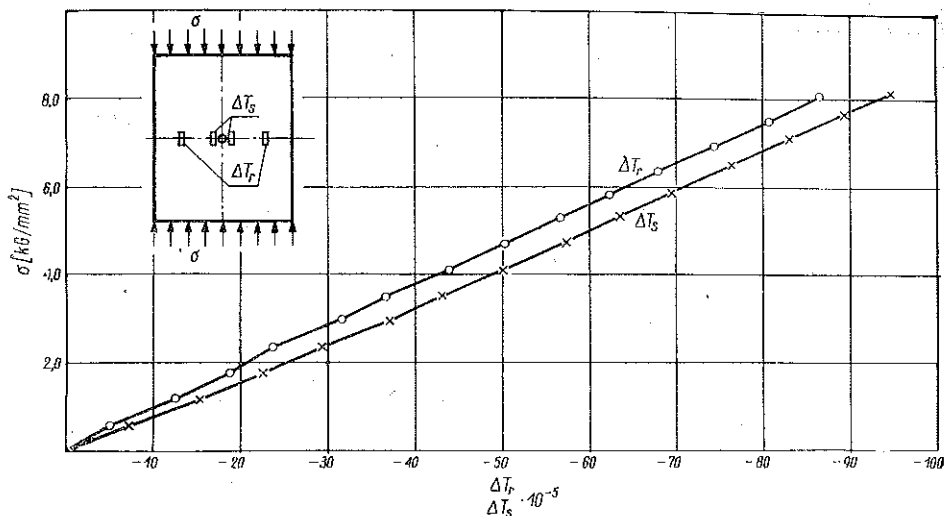
rysunku 18 przedstawiono w zmienionych skalach zależność naprężenia  $\sigma$  od różnicy przyrostów odkształcenia  $\Delta T = \Delta T_s - \Delta T_r$ . W danym zakresie zależność ta jest funkcją monotoniczną co zapewnia jednoznaczność wyznaczenia naprężeń. Krzywa wykresu jest zwrócona wypukłością w dół wykazując tendencję zwiększenia stromości przy większych wartościach  $\Delta T$ . Fakt ten powoduje zwiększenie bezwzględnej wartości błędu przy większych wartościach naprężeń. Przyjmując dokładność szacunkową odczytu na skali mostka  $\sim 0,33 \cdot 10^{-2} \%$ , z wykresu stwierdzamy, że w przedziale od 1 do 2,5  $\text{kG/mm}^2$  mierzonego naprężenia  $\sigma$  błąd ten wynosi  $\sim 0,16 \text{ kG/mm}^2$ ; w przedziale — 2,5 do 5  $\text{kG/mm}^2$  błąd wzrasta do  $\sim 0,4 \text{ kG/mm}^2$ , w przedziale — 5 do 8  $\text{kG/mm}^2$  błąd odczytu wynosi przeciętnie  $\sim 0,56 \text{ kG/mm}^2$ . W podanych przedziałach



Rys. 16. Próbką żeliwna z czujnikami kompensacyjnymi

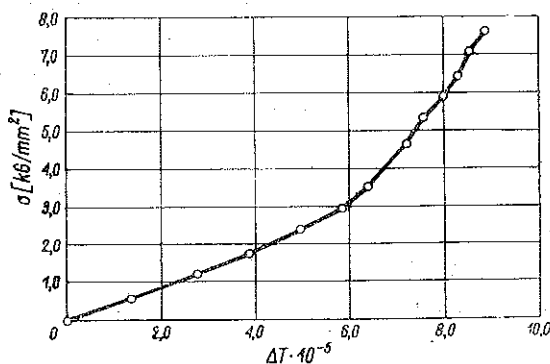


pomiaru błędy względne przyjmują odpowiednio wartości 12,8, 11,7 i 8,6%. W celu uproszczenia układu pomiarowego zastosowano układ różnicowy samokompensujący. W układzie tym dwa czujniki przy



Rys. 17. Wykres zależności naprężenia  $\sigma$  od średnich wartości przyrostów odkształceń  $\Delta T_r$  i  $\Delta T_s$  dla próbki żeliwnej

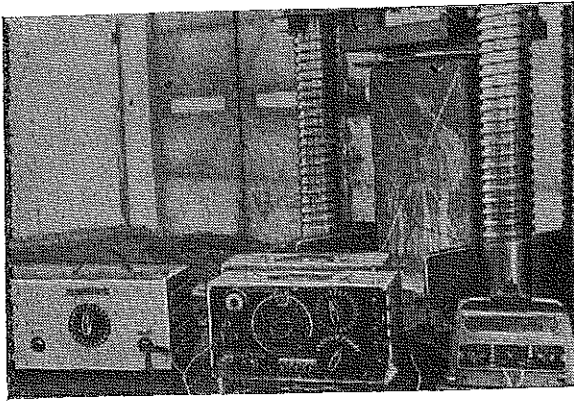
otworze połączone szeregowo tworzyły jedną gałąź mostka, zaś dwa czujniki zewnętrzne również połączone szeregowo drugą gałąź mostka. W układzie tym przyrząd rejestracyjny wykazuje wprost różnice między odkształceniem w obszarze sąsiadującym z otworem a odkształceniem w miejscach oddalonych od otworu. Otrzymane wyniki w tym układzie czujników zgadzały się z wynikami uzyskanymi przy pojedynczym włączeniu czujników w układ pomiarowy. Dla podwyższenia dokładności odczytu małych wartości przyrostu odkształceń mierzonych w układzie różnicowym samokompensującym przeprowadzono opisane próby metotą wychyłową podłączając na wyjściu z mostka galvanometr zwierciadłowy typu M4 CSR o czułości  $3,2 \cdot 10^{-8}$  A i oporze wewnętrznym  $R_w = 440 \Omega$ . Dobranie odpowiedniego zakresu na skali galvanometru przy



Rys. 18. Wykres zależności naprężenia  $\sigma$  od średnicy wartości różnicy przyrostów odkształceń  $\Delta T = \Delta T_s - \Delta T_r$  dla próbki żeliwnej

założonej z góry największej różnicy odkształceń umożliwił opornik dekadowy równolegle włączony w obwód galwanometru.

W podanym układzie czujników pomiarowych przy zastosowaniu galwanometru i przyjęciu dokładności odczytu 0,5 podziałki skali, całkowity



Rys. 19. Widok aparatury pomiarowej z podłączonym galwanometrem

zakres od 0 do 8  $\text{kG/mm}^2$  badanego stanu naprężenia odpowiadał 45 podziałkom skali. Odpowiednio do tych danych dokładność odczytu mierzonego przyrostu odkształcenia wynosi  $0,1 \cdot 10^{-2} \%$ . Przeciętne błędy średnie są teraz równe: 3,9% w przedziale od 0 do  $-2,5 \text{ kG/cm}^2$ ; 3,25% w przedziale od  $-2,5$  do  $-5 \text{ kG/cm}^2$ ; 2,6% w przedziale od  $-5$  do  $-8 \text{ kG/cm}^2$ .

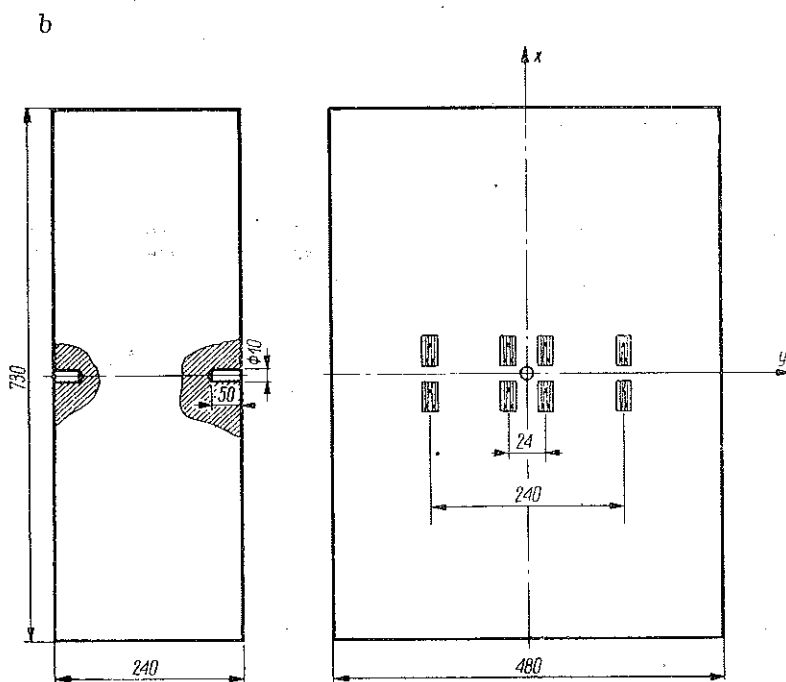
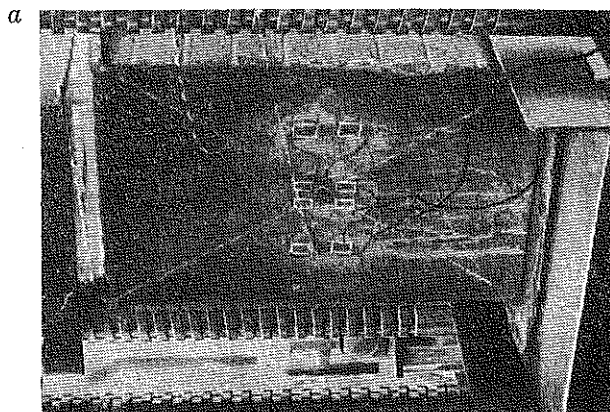
Uwzględniając dodatkowe możliwe źródła błędów, mianowicie błąd stałej  $k$  czujnika, błędy związane z naklejeniem czujników, błąd wskazań zrywarki należy przypuszczać, że określone przykładowo granice błędów mogą się zwiększać i osiągnąć wartości od 5 do 8%, co z punktu widzenia praktyki pomiarów wydaje się całkowicie zadowalające.

Z zestawienia przebiegu wykresów krzywych dla wzorców ze stali i żeliwa widać zasadniczą różnicę. Pierwsza krzywa ma kształt prawie linii prostej, druga natomiast wykazuje wybitnie krzywoliniowy przebieg, co można tłumaczyć nieliniową charakterystyką sprężystą żeliwa.

**4.3. Badania wzorcujące na próbkach wykonanych z gazobetonu.** W podobny sposób przeprowadzono próbę wzorcowania na prostopadłościennym słupie z gazobetonu o podanych na rys. 20a wymiarach i nawierceniach. Zastosowano tu układ 16 czujników pomiarowych po obu stronach słupa. Ze względu na możliwość wpływu niejednorodności strukturalnej betonu zastosowano podwójne czujniki o bazach 15 mm połączone szeregowo.

Przeprowadzona próba wykazała dobrą zgodność z założeniami metody jedynie dla gładkiej strony badanego elementu. Strona ta przy formowaniu bloku betonowego znajduje się na dole i odznacza się stosunkowo jednolitą budową i dobrymi własnościami sprężystymi. Rysunek 21 przedstawia wykres zależności między siłą ściskającą  $P$  a różnicą odkształceń  $\Delta T$ , mierzoną w układzie samokompensacyjnym po gładkiej stronie próbki. Z wartości mierzonych odkształceń po stronie gładkiej wyznaczono przeciętną

wartość rzeczywistego współczynnika  $\psi_{urz}$  równą 0,078. Dla porównania obliczono teoretyczny współczynnik P równy 0,083. Różnica między współczynnikiem rzeczywistym a teoretycznym w stosunku do współczynnika

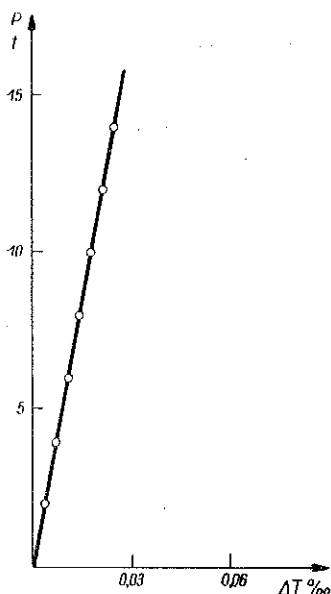


Rys. 20. Próbką z gazobetonu z nawierconymi otworami i układem czujników elektrooporowych

rzeczywistego wynosi 6,4%. Z wyników przeprowadzonej próby na wzorcu wykonanym z bloku gazobetonu można wysnuć następujące wnioski.

Zastosowanie metody nawiercania do badania stanu naprężenia w elementach z materiałów budowlanych takich jak beton jest znacznie utrudnione ze względu na to, że materiały te są przeważnie ciałami o wybitnie niejednorodnych własnościach mechanicznych.

W przypadku elementów dużych o wystarczająco równomiernych własnościach sprężystych w pewnym określonym obszarze elementu, zastosowanie metody nawiercania można by było oprzeć na odpowiednich próbach dokonywanych na próbkach o własnościach fizycznych jak najbardziej zbliżonych do własności badanego obszaru. Oczywiście spełnienie tego warunku w praktyce będzie nastęrczało dodatkowe trudności. Wydaje się, że w przypadku konkretnego zapotrzebowania na tego rodzaju badania stanu naprężenia w dużych elementach konstrukcyjnych o dostatecznie jednorodnej strukturze materiału lepsze wyniki można będzie osiągnąć metodą lokalnego odciążenia, [7].



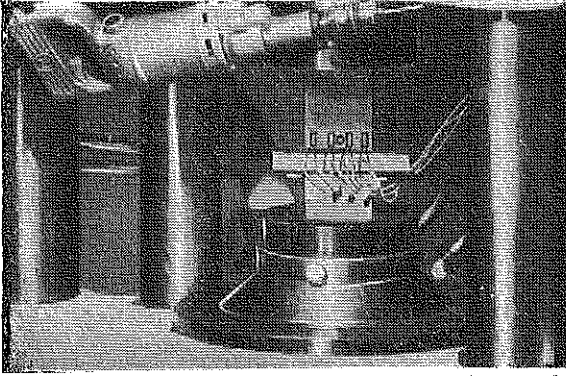
Rys. 21. Wykres zależności siły  $P$  od przyrostu odkształcenia  $\Delta T$

## 5. Badanie wpływu głębokości nawiercania

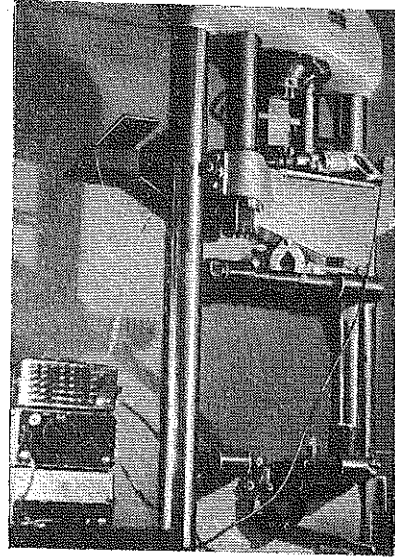
W celu zbadania wpływu głębokości otworu na wskazania mostka tensometrycznego przy pomiarach półtrepanacyjnych wykonano specjalną próbę nawiercania naprężonej prostopadłościenną próbkę stalowej o wymiarach przekroju  $80 \times 80$  mm i wysokości 180 mm (rys. 22a i 22b).

Na jednej ścianie próbki naklejono symetrycznie 4 czujniki elektrooporowe o podstawach 10 mm. Próbkę ściśnięto siłą osiową 45 t i przy tym obciążeniu stale działającym nawiercano otwór między czujnikami wiertłem o średnicy 5 mm. W miarę wzrostu głębokości otworu wyznaczono różnicę  $T$  między średnimi wskazaniami czujników przy otworze, a średnimi wskazaniami czujników z dala od otworu. Rysunek 23 przedstawia wykres zależności  $\Delta T = \Delta T(h)$ . Z wykresu wynika, że przy wartości  $h$  przekraczającej czterokrotnie średnicę wierconego otworu odkształcenie  $\Delta T$  przyjmuje stałą wartość, którą można uważać za miarodajną, jeżeli chodzi o badanie stanu naprężenia w większych masywach sprężystych.

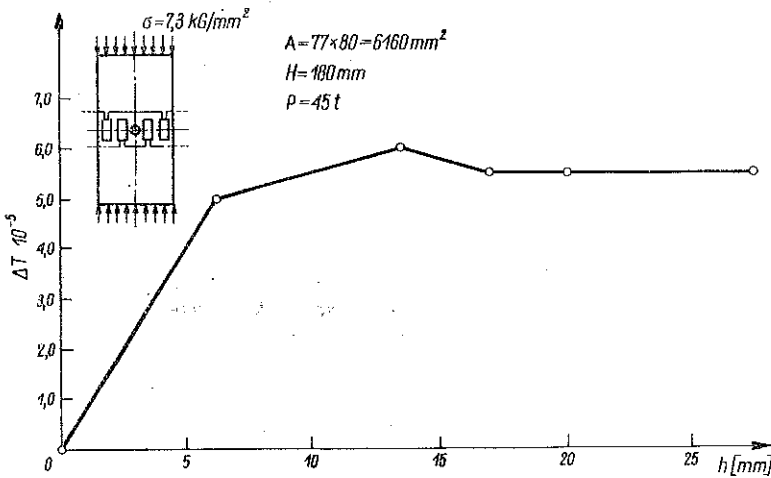
a



b



Rys. 22. Próbkę stalową i stanowisko do badania wpływu głębokości nawiercania



Rys. 23. Wykres zależności  $\Delta T$  od głębokości nawiercania  $h$

## 6. Wnioski

Z podanej wyżej analizy wynika możliwość zastosowania metody nawiercania do badania jednoosiowego stanu naprężenia w elementach konstrukcyjnych wykonanych zarówno z materiałów liniowo, jak i nieliniowo sprężystych, takich jak żeliwo, beton i ewentualnie tworzywa sztuczne. W każdym poszczególnym przypadku badania należy przeprowadzić próbę wzorcującą na odpowiednio ukształtowanej próbce.

Średnica nawierconego otworu powinna być w stosunku do wymiarów poprzecznych badanego elementu możliwie mała ze względu na łatwość nawiercania i ograniczenie zasięgu obszaru spiętrzenia naprężeń. Zbyt małe jednak średnice otworów w stosunku do wymiarów czujnika nie dają pożądanej dokładności pomiaru. Praktycznie zaleca się stosowanie średnic otworów bliskich szerokości czujnika elektro-oporowego.

W przypadku badania dużych masywów wystarczają, jak wykazały próby, nawiercenia do głębokości równej czterokrotnej średnicy otworu.

Przy analizie otrzymanych tą metodą wyników należy pamiętać o tym, że tym bardziej są one wiarogodne, im mniej różnią się od siebie własności sprężyste próbki i elementu.

#### Literatura cytowana w tekście

- [1] J. Mathar, *Ermittlungen von Eigenspannungen durch Messung von Bohrlochverformungen*, Arch. Eisenhüttenwesen, 6, 6 (1932), s. 277-281.
- [2] G. Mesmer, *Fliesserscheinungen bei Spannungsmessverfahren nach J. Mathar*, Arch. Eisenhüttenwesen, 2, 10 (1936), s. 59-63 (Gruppe E. Bericht No 529).
- [3] W. Soete and R. Vancrombrugge, *An Industrial Method for the Determination of Residual Stresses*, Proc. Soci. Exper. Stress Anal. 1, 8 (1950).
- [4] C. Riparbelli, *A Method for the Determination of Residual Stresses*, Proc. Soci. Exper. Stress Anal. 1, 8 (1950).
- [5] R. A. Kelsey, *Measuring Non-Uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method*, Proc. Soci. Exper. Stress Anal. 1, 14 (1956).
- [6] Z. Orłoś, *Pomiary naprężeń w budowie maszyn*, PWT Warszawa 1956.
- [7] Z. Orłoś, Z. Dyląg, *Pomiar naprężeń metodą miejscowego odciążenia*, Biul. WAT, 4 (81), 1958.

#### Резюме

#### ПОЛУТРЕПАНАЦИОННЫЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Обсуждается принцип полутрепанационного сравнительного метода измерения напряжений в элементах инженерных конструкций. В этом методе напряжения определяются на основании измерения деформаций поверхности нагруженного элемента после высверления соответствующих отверстий. Этот метод был разработан, главным образом, для исследования напряженного состояния существующего в готовом элементе конструкции работающего при действительной нагрузке. В работе дается теория, на которой основывается метод, а также анализ влияния характеристических параметров выбранной измерительной схемы датчиков омического сопротивления и устанавливаются основные лабораторные соотношения для образцов изготовленных из стали, чугуна и «сипорекса». Определяются также наиболее важные факторы, влияющие на точность метода.

## S u m m a r y

### HALF-TREPANATION COMPARATIVE METHOD OF STRESS MEASUREMENT

A discussion of the principle of the half-trepanation comparative method of stress measurement in structural elements. The stresses are determined on the basis of measurements of the deformation of the surface at the loaded element by making suitable drillings. This method was developed first for the purpose of examining the state of stress in an existing structural element with a real load. The theory constituting the basis of the method is described, and an analysis is made of the influence of the characteristic parameters of the system of strain gauges chosen for the measurement. Basic relations for gauges made of steel, cast iron, or siporex are established by means of laboratory tests. The principal factors influencing the accuracy of the method are discussed.

*Praca została złożona w Redakcji dnia 27 lutego 1959 r.*

---