

## WYTRZYMAŁOŚCIOWE BADANIA MODELI ZBIORNIKÓW CIŚNIENIOWYCH\*)

STANISŁAW OCHELSKI, ZBIGNIEW ORŁOŚ, MANFRED SZOPA,  
KAZIMIERZ TOMASZEWSKI (WARSZAWA)

### 1. Wstęp

Problem racjonalnego kształtowania wytrzymałościowego naczyń ciśnieniowych jest przedmiotem coraz intensywniej rozwijanych prac badawczych teoretycznych i doświadczalnych. Badania te wiążą się w szczególności z budową dużych kotłów energetycznych, w których stosowane są elementy wysokociśnieniowe (walczak, komory, rury), spełniające szczególnie odpowiedzialne zadanie.

Doprowadzenie i odprowadzenie nośnika energii cieplnej wymaga wykonania licznych otworów w naczyniach ciśnieniowych. Niektóre z tych otworów są wzmacniane króćcami. Okresowe przeglądy wielu kotłów ujawniły między innymi pęknięcia występujące w obszarach połączeń płaszcza walczaka z króćcami centralnych rur opadowych. Pęknięcia te spowodowały długotrwałe postoje bloków energetycznych i kosztowne naprawy walczaków.

Spośród różnych możliwości oceny wytrzymałości połączeń króćcowych na uwagę zasługują metody badań modelowych prowadzonych przy wykorzystaniu doświadczalnej analizy naprężeń (tensometria, elastooptyka). Cennym uzupełnieniem wymienionych sposobów może być również metoda badań niszczących modeli zbiorników ciśnieniowych. Wykonany z określonego tworzywa model badanego obiektu poddaje się wzrastającym obciążeniom aż do jego zniszczenia. W przypadku badań różnych rozwiązań konstrukcyjnych naczyń ciśnieniowych można wytypować kształt najpoprawniejszy pod względem wytrzymałościowym. Badania w omawianej dziedzinie uzasadniają zdaniem autorów wybór określonej wersji kształtu rozpatrywanego węzła konstrukcyjnego.

### 2. Zakres badań

Program prac związanych z oceną wytrzymałości zbiorników ciśnieniowych metodą modelową obejmował badania:

- materiałowe,
- elastooptyczne,
- tensometryczne,
- niszczące.

W dalszym ciągu omówiona zostanie charakterystyka wymienionych kierunków badań wraz z przedstawieniem niektórych uzyskanych wyników.

---

\*) Praca została wyróżniona na Ogólnopolskim Konkursie na prace doświadczalne z mechaniki technicznej, organizowanym przez Oddział PTMTS w Częstochowie w 1974 r.

## 3. Badania materiałowe

Do wykonywania modeli połączeń króćców z płaszczem walczaka używano krajową żywicę epoksydową Epidian 5 (100 cz. w.) z plastyfikatorem ftalanem dwu-*n*-butylowym (20 cz. w.) utwardzoną trójetyloczteroaminą Z-1 (10 cz. w.) oraz żywicę epoksydową firmy szwajcarskiej CIBA-GEIGY LY554 (100 cz.w.) z utwardzaczem HY554 (15 cz.w.).

Dla materiałów tych określono charakterystyki mechaniczne i optyczne w temperaturze pokojowej, zaś dla żywicy LY554 również i w temperaturze zamrażania.

Wyniki zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Wielkość	Epidian 5 (100 cz.w.) Ftalan dwu- <i>n</i> -butylowy (20 cz.w.) Utwardzacz Z-1 (10 cz.w.)	LY554 (100 cz.w.) HY554 (15 cz.w.)	
	temperatura 20°C	temp. 20°C	temp. zamraż. 85°C
Moduł sprężystości podłużnej $E$ [kG/cm <sup>2</sup> ]	28 500	29 000	105
Współczynnik Poissona $\nu$	0,36	0,36	~0,50
Elastoptyczna naprężeniowa stała materiałowa $K_{\sigma} \left[ \frac{\text{kG}}{\text{cm} \cdot \text{j} \cdot \text{rz} \cdot \text{iz}} \right]$	12 (dla $t = 1 \text{ h}$ )	15 (dla $t \approx 0$ )	0,30

Prowadzono ponadto badania reologiczne dotyczące własności mechanicznych i optycznych wymienionych materiałów modelowych.

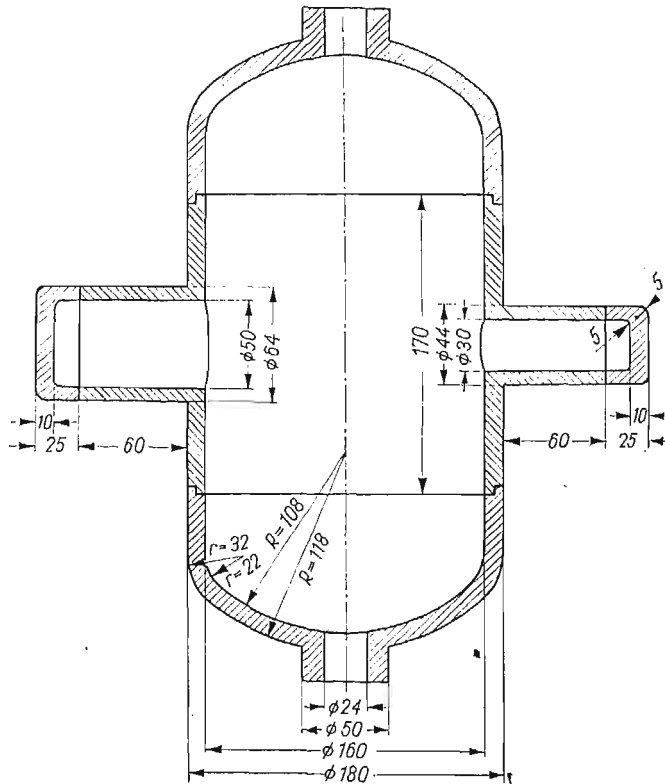
## 4. Badania elastoptyczne metodą zamrażania

Modele z żywicy epoksydowych wykonywano metodą odlewania w formach z kauczuku silikonowego RTV130 utwardzanego katalizatorem C. Do odtworzenia kształtu modeli w formach wykorzystywano metalowe modele wzorcowe o dużej dokładności wykonania [1].

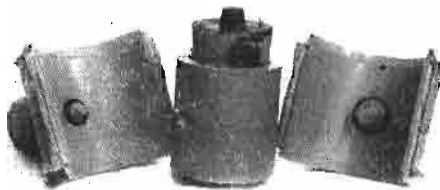
Forma części środkowej z króćcami była dzielona zewnętrznie i wewnętrznie. Dla usztywnienia części zewnętrznej zastosowano zbrojenie prętami metalowymi, ułożonymi równolegle do osi modelu. Dodatkowym usztywnieniem części zewnętrznych formy były powłoki gipsowe.

Formy modeli dennic składały się z jednolitej części zewnętrznej, podstawy oraz niedzielonego rdzenia.

Przedmiotem badań były niektóre typy połączeń króćcowych. Na rys. 1 pokazano przykładowo kształt i rozmiary modelu walczaka z dwoma króćcami nieprzytykanymi. Części formy płaszcza walczaka z króćcami przedstawiono na rys. 2, a widok całej formy —



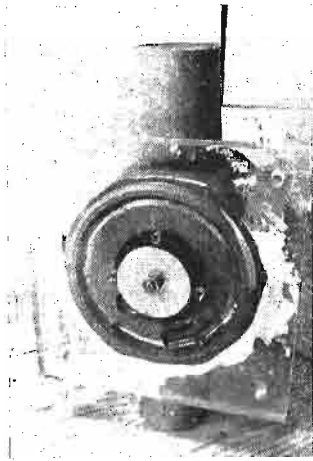
Rys. 1. Kształt i rozmiary modelu



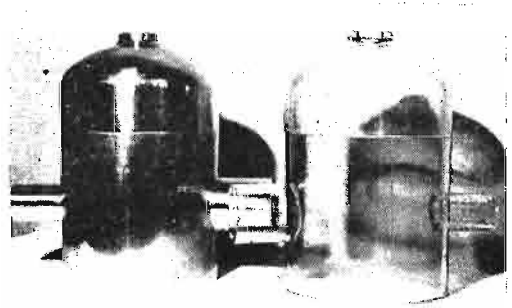
Rys. 2. Gumowe części formy płaszcza walczaka z króćcami

na rys. 3. Metalowe modele wzorcowe i odpowiednie odlewy z żywicy epoksydowej pokazano na rys. 4.

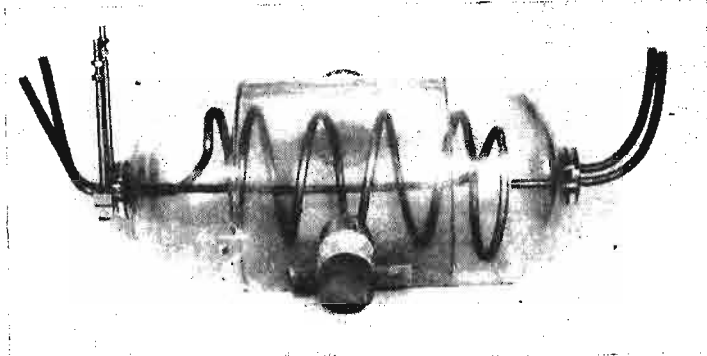
Na rys. 5 przedstawiono cały model walczaka wraz z wymiennikiem ciepła i układem rurek, które służą do realizowania obciążenia we wnętrzu walczaka. Na modelu naklejono kilkanaście termoelementów dla rejestracji temperatur w procesie zamrażania.



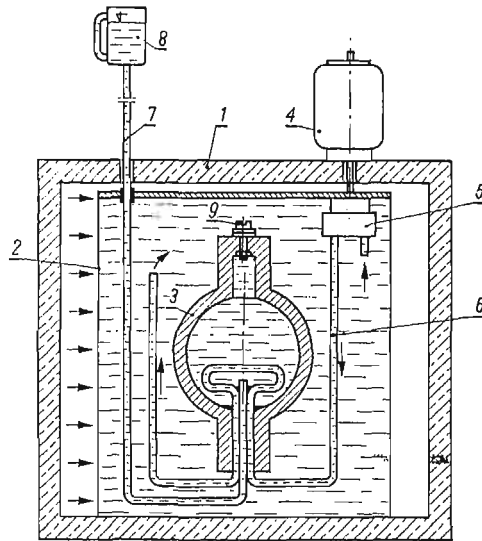
Rys. 3. Forma płaszcza walczaka z króćcami



Rys. 4. Modele metalowe wzorcowe i części modeli z żywicy epoksydowej



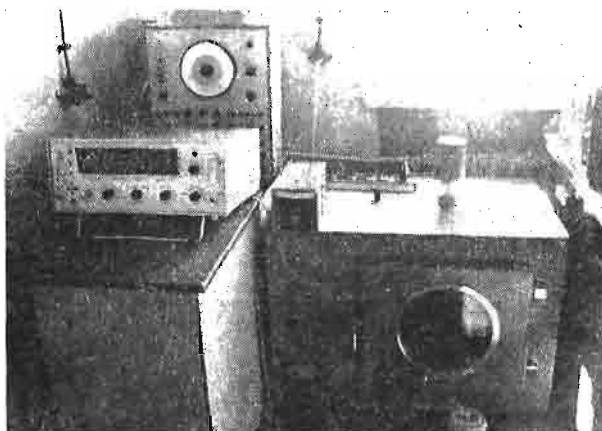
Rys. 5. Model walczaka z rurami wymiennika ciepła i układu obciążającego



Rys. 6. Schemat stanowiska do zamrażania modeli walczków

Stanowisko do zamrażania efektów optycznych (patrz rys. 6) obejmuje:

1. komorę cieplną typu KC-100,
2. pojemnik z gliceryną,
3. model zamrażany,
- 4 i 5. silnik elektryczny i pompę do wywołania krążenia czynnika grzewczego w wymienniku ciepła we wnętrzu modelu,
- 6 i 7. układ rurek obiegu cieczy i obciążenia hydrostatycznego,
8. zbiornik układu ciśnienia hydrostatycznego,
9. zawór odpowietrzający modelu.



Rys. 7. Stanowisko do zamrażania efektów optycznych

Ponadto stanowisko (rys. 7) posiada:

- regulator programujący i sterujący zmiany temperatury grzejników komory KC-100,
- skrzynkę rozdzielczą połączoną z woltomierzem cyfrowym dla rejestracji temperatur w punktach naklejenia termoelementów.

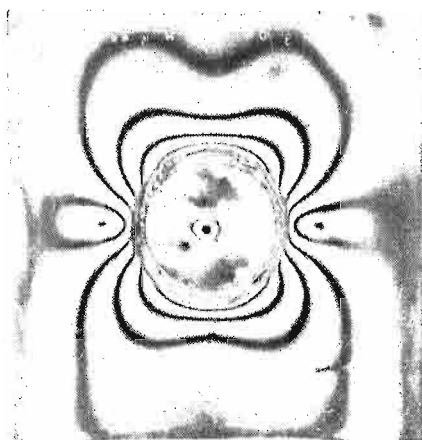
Zamrażanie modelu przeprowadzono według następującego programu:

- wzrost od temperatury otoczenia ( $20^{\circ}\text{C}$ ) do temperatury zamrażania  $-85^{\circ}\text{C}$  wynosi  $4\text{ deg/h}$ ,
- przetrzymanie w temperaturze zamrażania przez 4 h,
- spadek od temperatury zamrażania do temperatury pokojowej  $2\text{ deg/h}$ ,
- ciśnienie hydrostatyczne w walczaku  $p = 0,12\text{ kG/cm}^2$ .

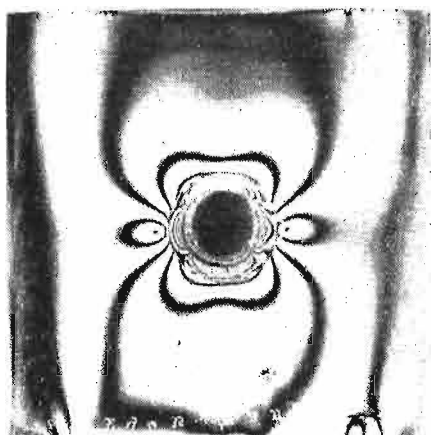
Równoległe z modelem walczaka zamrożono obciążone próbki wzorcujące w celu określenia naprężeniowej elastooptycznej stałej materiałowej  $K_{\sigma}$  i modułu sprężystości podłużnej  $E$  w temperaturze zamrażania.

Rysunki 8, 9 i 10 pokazują obrazy zamrożonych izochrom przy prześwietlaniu światłem sodowym kołowo spolaryzowanym. Obrazy te służą do oceny naprężeń błonowych w modelu.

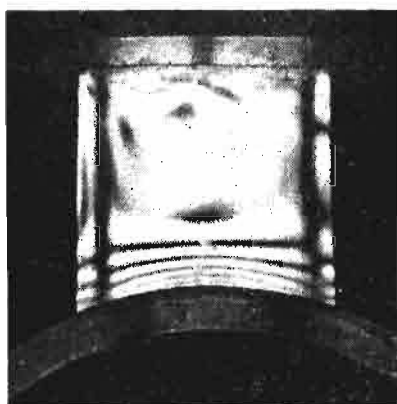
Dla określenia naprężeń w obszarze połączenia króćcowego wydzielono z modelu płytki i podpłytki. Z każdego badanego połączenia wycięto dwie płytki cienkie ( $\sim 3\text{ mm}$ ) w głównych płaszczyznach wzdłużnej i obwodowej walczaka. Analogiczne dwie płytki



Rys. 8. Izochromy całkowite w walczaku z króćcem  $\emptyset 64/\emptyset 50$  przy prześwietlaniu wzdłuż osi króćca



Rys. 9. Izochromy całkowite w walczaku z króćcem  $\emptyset 44/\emptyset 30$  przy prześwietlaniu wzdłuż osi króćca



Rys. 10. Izochromy całkowite w króćcu  $\emptyset 64/\emptyset 50$  przy prześwietlaniu wzdłuż osi walczaka

grubsze ( $\sim 5$  mm) posłużyły do pocięcia na podpłytki. Przykład podziału płytek na podpłytki w płaszczyźnie wzdłużnej pokazano na rys. 11.

Pomiary rzędów izochrom w płytkach i podpłytkach prowadzono przy użyciu mikropolaryskopu własnej konstrukcji o powiększeniu pola widzenia  $10\times$ ,  $15\times$  i  $30\times$ .

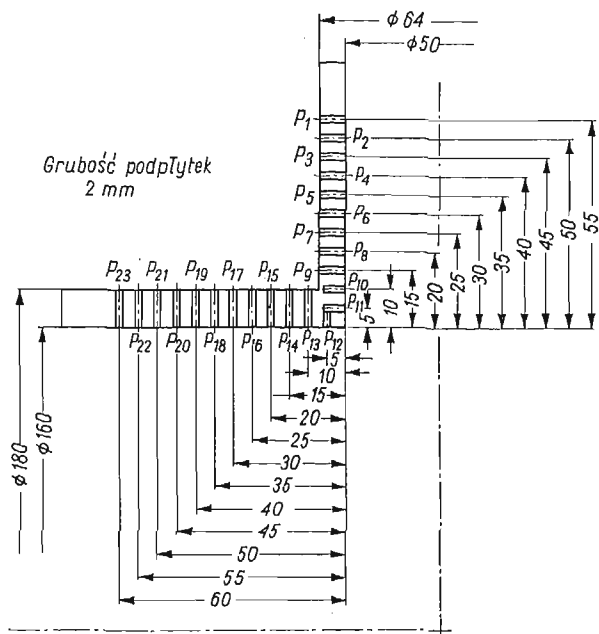
Obrazy izochrom w płytkach pokazano na rys. 12 i 13.

Na zewnętrznej powierzchni modelu walczaka naprężenia  $\sigma^z$  obliczono z zależności

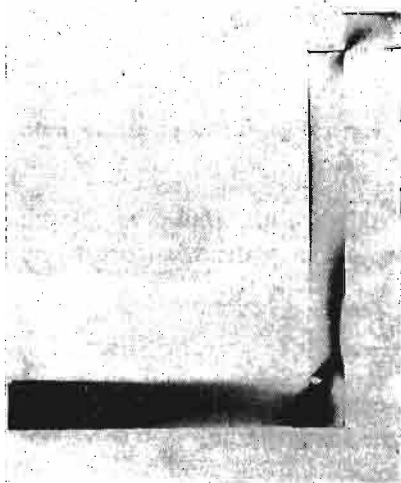
$$(1) \quad \sigma^z = K_{\sigma m} m,$$

natomiast na wewnętrznej powierzchni naprężenia  $\sigma^w$  wyznaczono z zależności

$$(2) \quad \sigma^w = K_{\sigma m} m - p.$$



Rys. 11. Podział płytki z głównej płaszczyzny podłużnej walczaka z króćcem  $\varnothing 64/\varnothing 50$  na podpłytki



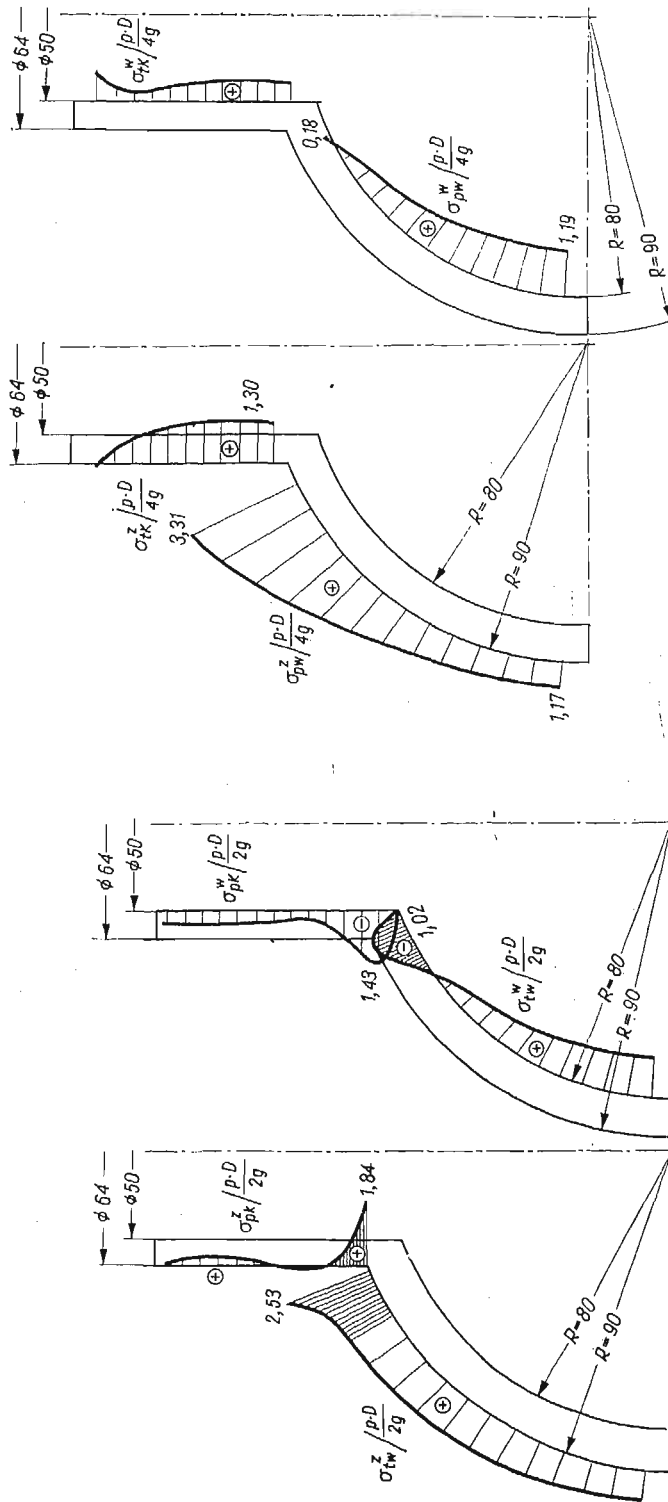
Rys. 12. Izochromy półkowe w płycie podłużnej walczaka z króćcem  $\varnothing 44/\varnothing 30$



Rys. 13. Izochromy całkowite w płycie obwodowej walczaka z króćcem  $\varnothing 64/\varnothing 50$





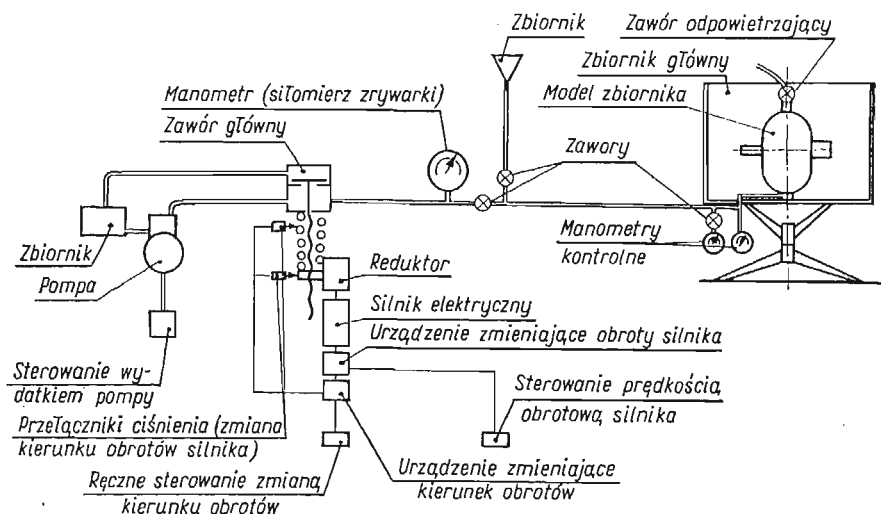


Rys. 16. Rozkłady naprężeń w płaszczyźnie obwodowej połączenia walczaka z króćcem  $\varnothing 64/\varnothing 50$ :  $\sigma_{pk}^w$ ,  $\sigma_{tw}^w$ ,  $\sigma_{pk}^w$ ,  $\sigma_{tw}^w$

Rys. 17. Rozkład naprężeń w płaszczyźnie obwodowej połączenia walczaka z króćcem  $\varnothing 64/\varnothing 50$ :  $\sigma_{ik}^w$ ,  $\sigma_{pw}^w$ ,  $\sigma_{ik}^w$ ,  $\sigma_{pw}^w$

## 5. Badania nieniszczące

Celem badań nieniszczących było określenie wpływu grubości ścianki króćca na stan naprężenia w niektórych punktach modelu walczaka. Grubość ścianki króćca zmieniano stopniowo przez powiększanie jego średnicy wewnętrznej. Odształcenia występujące podczas próby ciśnieniowej określano metodą tensometrii elektrooporowej. Równoległe stosowano elastooptyczną metodę warstwy odbłaskowej prowadząc obserwacje izochrom w ściance modelu. Badania nieniszczące prowadzono na specjalnie opracowanym stanowisku (rys. 18 i 19). W stanowisku do wytworzenia ciśnienia w modelu zbiornika wyko-

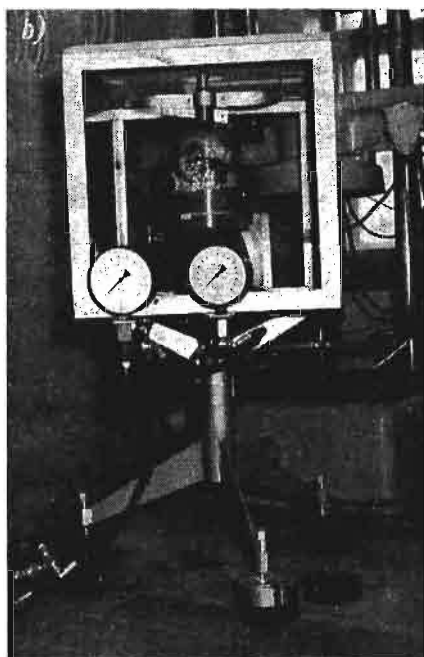
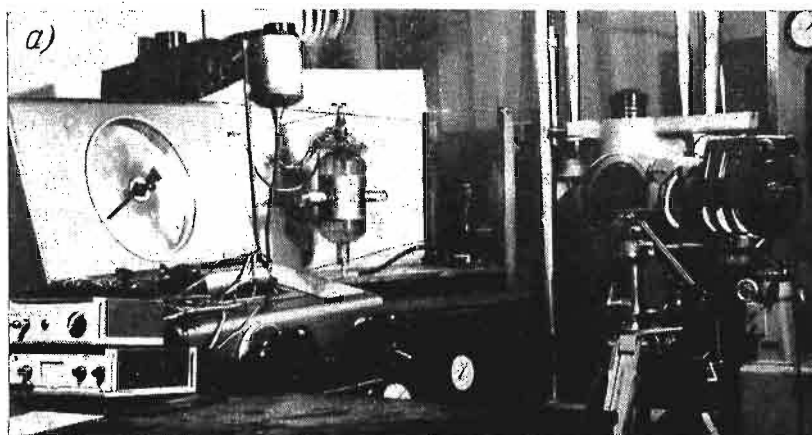


Rys. 18. Schemat stanowiska do badań modelowych walczaków

zystano maszynę wytrzymałościową typu ZD-10. Stanowisko to oprócz utrzymywania stałego ciśnienia w zakresie (0 - 200) kG/cm<sup>2</sup> zapewnia płynnie regulowany w czasie przyrost ciśnienia w przedziale (0,01 - 20,0) kG/cm<sup>2</sup> · s. Na stanowisku można również realizować cykliczną zmianę ciśnienia w podanym poprzednio zakresie, przy czym okres cyklu obciążenia ustala się w przedziale (5 - 500) s.

Zasadniczą rolę w utrzymaniu ciśnienia w modelu zbiornika, jak też w realizowaniu żądanego programu zmiany ciśnienia w czasie, spełnia zawór główny wraz z zaprojektowanymi dodatkowo urządzeniami. Urządzenia te umożliwiają zmianę prędkości i kierunku obrotów silnika elektrycznego, ściskającego sprężynę zaworu głównego. Napełnianie płynem modelu następuje ze zbiornika ustawionego powyżej poziomu modelu, przy otwartym zaworze odpowietrzającym.

Model zbiornika umieszczony jest w zbiorniku głównym o ściankach przezroczystych wykonanych z polimetakrylanu metylu o grubości 20 mm. W stanowisku zapewniona jest możliwość obrotu modelu względem własnej osi, jak też i obrót całego zbiornika głównego, co niezbędne jest do obserwacji izochrom za pomocą polaryskopu odbłaskowego. Dokładność pomiaru ciśnienia zwiększona została przez zastosowanie dodatkowych manometrów o zróżnicowanych zakresach pomiarowych.



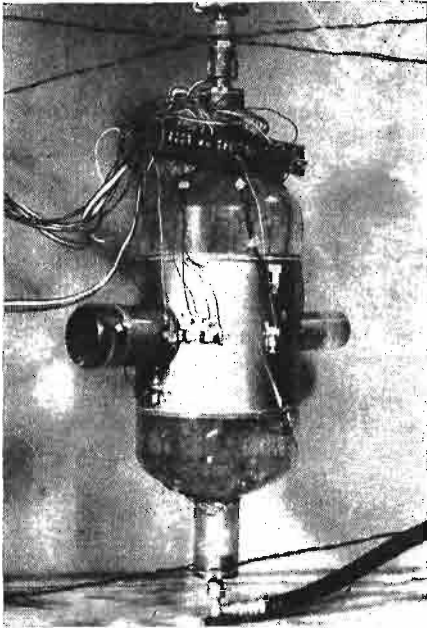
Rys. 19. Stanowisko do badań metodami tenso-  
metryczną i elastooptyczną za pomocą warstwy  
odblaskowej

Na rys. 20 przedstawiono przygotowany do badań model walczaka umieszczony w zbiorniku głównym stanowiska.

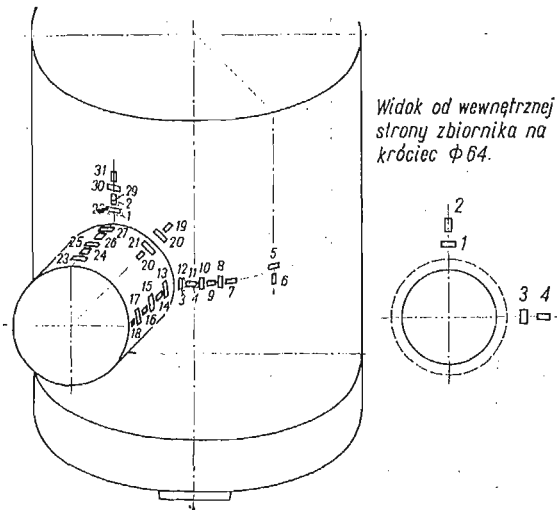
Przed sklejeniem modelu część środkową od strony wewnętrznej pokryto kompozycją odblaskową. Kompozycja ta składa się z dwóch części wagowych żywicy E-57 z odpowiednią ilością utwardzacza z dodatkiem jednej części proszku aluminiowego i pięciu części acetonu.

Do pomiaru odkształceń badanego modelu użyto 21 sztuk czujników elektrooporowych o długości pomiarowej 4,5 mm i oporności 60  $\Omega$ . Czujniki naklejane były na modelu w dwóch kierunkach — obwodowym i wzdłużnym w odległości 10 mm jeden od drugiego.

Obok czujnika mierzącego odkształcenie wzdłużne był umieszczony czujnik mierzący odkształcenie obwodowe. Rozmieszczenie tensometrów na modelu przedstawiono na rys. 21.



Rys. 20. Model walczaka przygotowany do badań



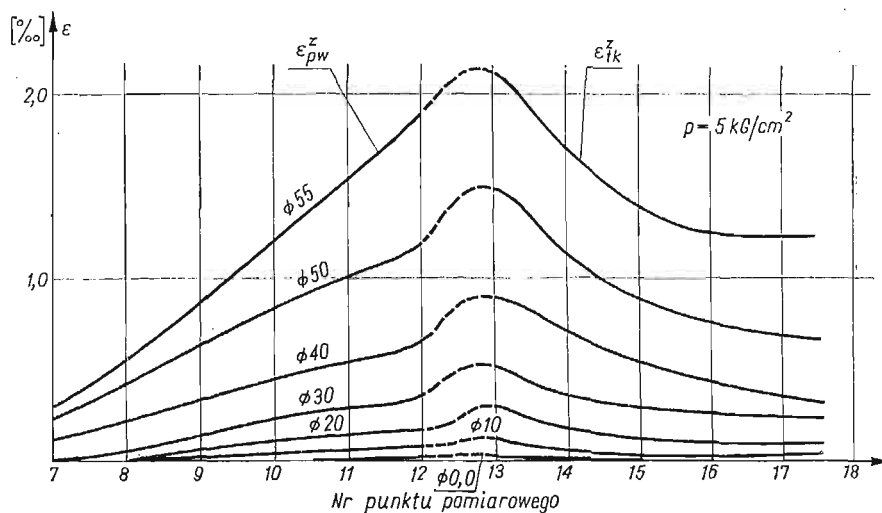
Rys. 21. Rozmieszczenie tensometrów na modelu

Aby uniknąć odkształceń cieplnych, model walczaka napełniany był wodą o temperaturze równej temperaturze otoczenia, a badania rozpoczynano po upływie czterech godzin od chwili napełnienia.

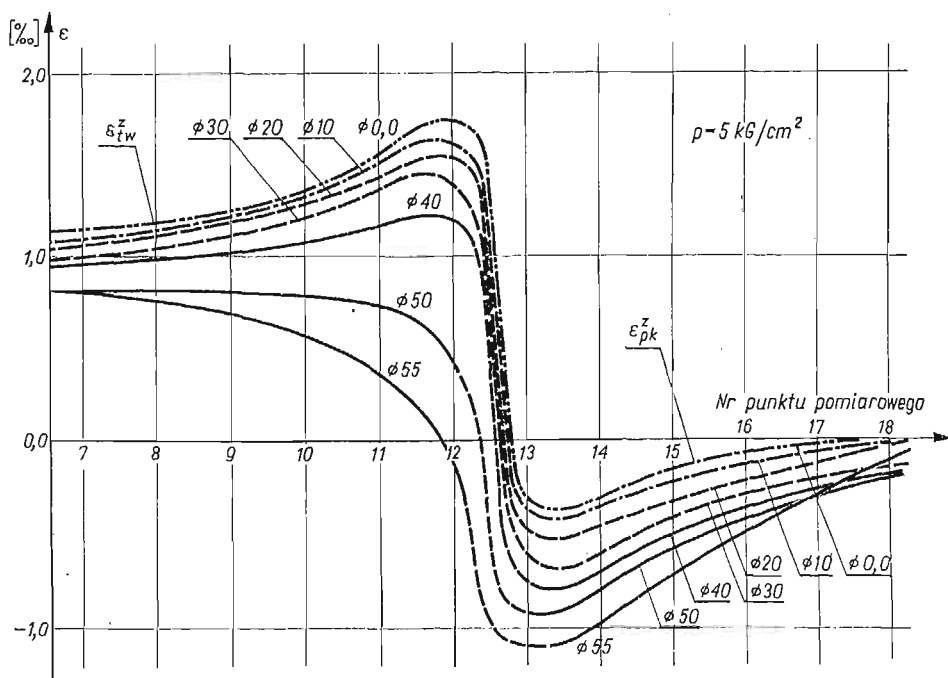
Program obejmował badania modeli przy skokowo zmieniającej się grubości ścianki króćca równej: 25,75; 20,75; 15,75; 10,75; 5,75 i 3,25 mm, co odpowiadało następującym

średnicom otworu króćca: 0,0; 10; 20; 30; 40; 50 i 55 mm. Model zbiornika obciążano kolejno ciśnieniami: 0,0; 2; 4; 5 i 10,0 kG/cm<sup>2</sup>. Między obciążeniami odczytywano wskazania czujników, jak też wykonywano zdjęcia izochrom.

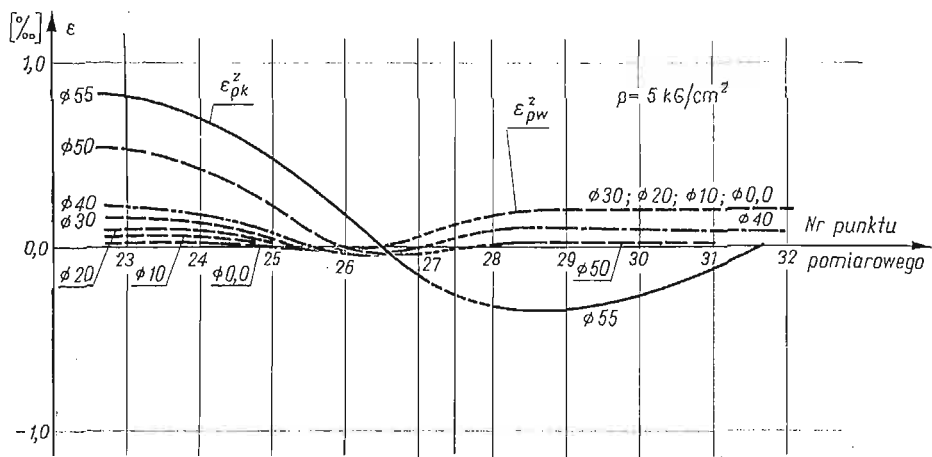
Wyniki badań tensometrycznych przy obciążeniu modelu ciśnieniem 5 kG/cm<sup>2</sup> przed-



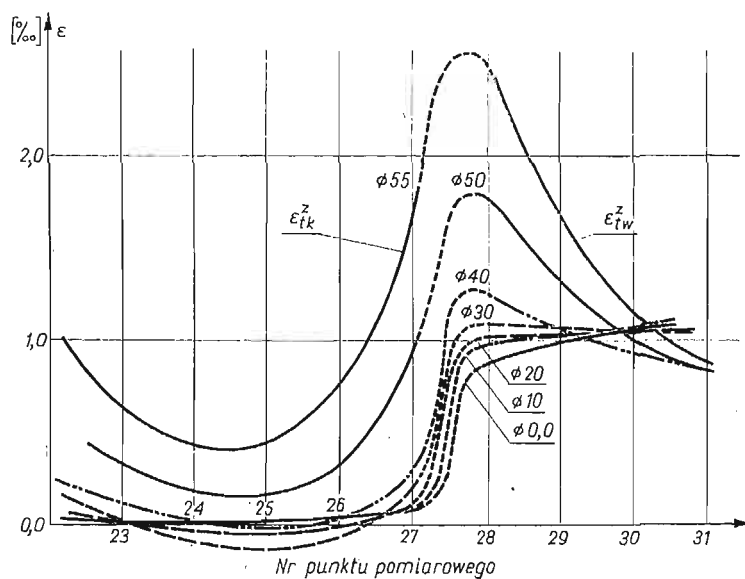
Rys. 22. Rozkład odkształceń wzdłużnych  $\epsilon_{pw}^z$  warstwy zewnętrznej walczaka i odkształceń obwodowych  $\epsilon_{tk}^z$  warstwy zewnętrznej króćca



Rys. 23. Rozkład odkształceń obwodowych  $\epsilon_{tw}^z$  warstwy zewnętrznej walczaka i odkształceń wzdłużnych  $\epsilon_{pk}^z$  warstwy zewnętrznej króćca



Rys. 24. Rozkłady odkształceń wzdłużnych  $\epsilon_{pk}^z$  warstwy zewnętrznej króćca i  $\epsilon_{pw}^z$  — warstwy zewnętrznej walczaka



Rys. 25. Rozkłady odkształceń obwodowych  $\epsilon_{tk}^z$  warstwy zewnętrznej króćca i  $\epsilon_{tw}^z$  warstwy zewnętrznej walczaka



Rys. 26. Rozkład izochrom uzyskany przy zastosowaniu warstwy odblaskowej

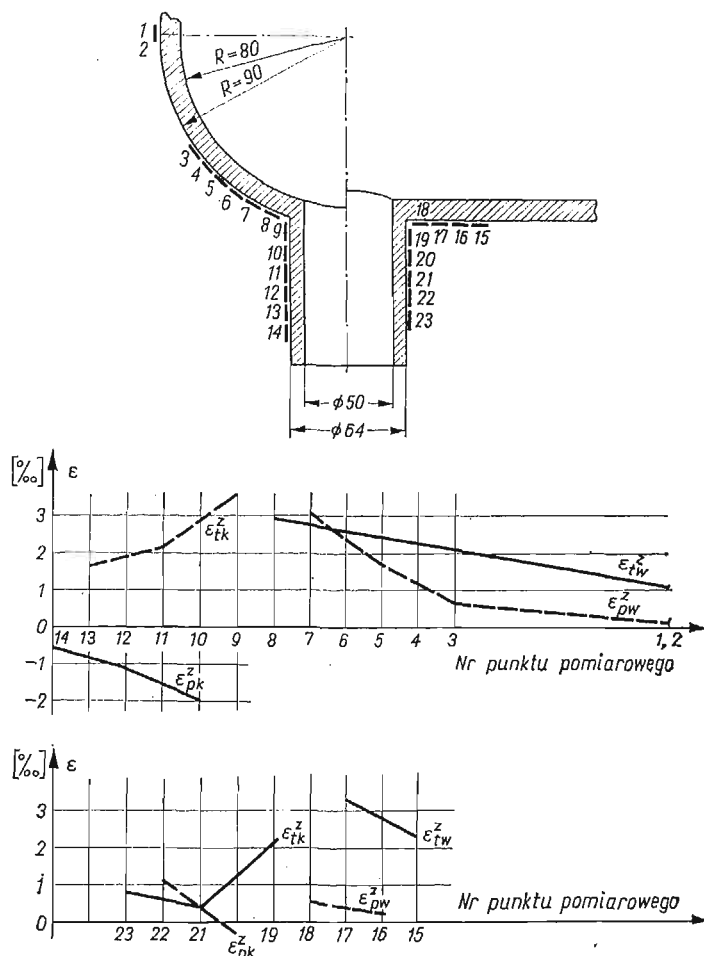
stawiono na rys. 22-25. Uzyskane podczas obciążeń odkształcenia miały w zasadzie charakter liniowo sprężysty.

Rozkład izochrom dla wyżej wspomnianego programu badań obserwowano w polaryskopie odbłaskowym.

Zarejestrowane fotograficznie rozkłady izochrom dla naprężeń membranowych mają kształt bardzo podobny do rozkładów uzyskanych w próbie zamrażania (rys. 8), co widać na pokazanym przykładowo (rys. 26) jednym ze zdjęć wykonanym dla króćca o średnicy  $\emptyset 64/\emptyset 50$  przy obciążeniu modelu ciśnieniem  $p = 2,5 \text{ kG/cm}^2$ .

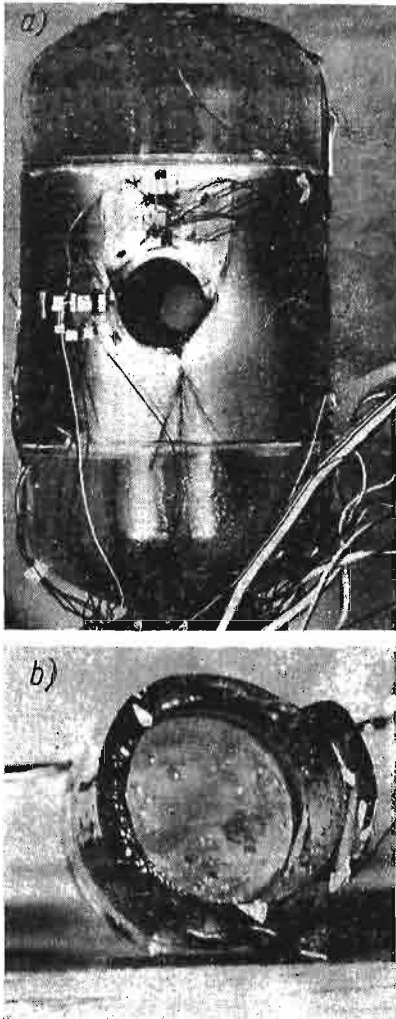
### 6. Badania niszczące

Celem badań niszczących było wyjaśnienie możliwości oceny postaci zniszczenia modelu zbiornika oraz określenie wartości odpowiedniego ciśnienia niszczącego. Do realizacji badań wykorzystano stanowisko pomiarowe opisane poprzednio w rozdziale 5.



Rys. 27. Odkształcenia wzdłużne i obwodowe w obszarze połączenia króćcowego w przekrojach osiowym i poprzecznym

Podobnie jak w badaniach nieniszczących, model zbiornika posiadał wewnętrzną warstwę odbłaskową oraz układ czujników elektrooporowych w obszarach połączeń króćcowych. Pomiarów odkształceń dokonywano przy ciśnieniu 2,5; 10,0 i 15,0 kG/cm<sup>2</sup>. Na rys. 27 przedstawiono odkształcenia obwodowe i wzdłużne w przekrojach poprzecznym i osiowym modelu przy ciśnieniu  $p = 15$  kG/cm<sup>2</sup>.



Rys. 28.a. Model po próbie niszczącej,  
b. Powierzchnia przełomu króćca  
Ø 64/Ø 50

Model uległ zniszczeniu przy ciśnieniu równym 18,5 kG/cm<sup>2</sup> wykazując w miejscach połączenia króćców z płaszczem walczaka przełomy o ukośnie nachylonych powierzchniach. Ponadto w płaszczu walczaka wystąpiły pęknięcia o liniach propagacji rozpoczynających się u nasady króćców i biegnących w kierunku wzdłużnym walczaka. Linie wymienionych pęknięć widoczne są na rys. 28a, powierzchnia przełomu króćca Ø 64/Ø 50 — na rys. 28b. Należy zauważyć, że opisywany przebieg próby niszczącej miał



w końcowej fazie charakter dynamiczny. Przyczyną powodującą powstanie pęknięcia będącego początkiem dynamicznego zniszczenia spójności połączenia były spiętrzenia naprężeń lokalizujące się u nasady króćców.

## 7. Wnioski

W wyniku opisanych doświadczeń uzyskano pomyślne rezultaty w prowadzonych pracach nad kompleksową metodą oceny wytrzymałości zbiorników ciśnieniowych w oparciu o eksperymentalną analizę naprężeń odpowiednich modeli fizycznych, geometrycznie podobnych do obiektów rzeczywistych.

Uzyskano wytyczne doboru materiału modelowego, opracowano sposoby wykonywania modeli przestrzennych o złożonym kształcie, opanowano odpowiednią technikę zamrażania, podziału na płytki i podpłytki oraz metodę prowadzenia pomiarów elastooptycznych zamrożonych efektów dwójłomności wymuszonej.

Potwierdzono przydatność sposobu realizacji zamierzonych badań nieniszczących i niszczących przy równoczesnym prowadzeniu pomiarów metodami tensometrii elektrooporowej i elastooptyki odblaskowej.

W świetle uzyskanych wyników wydaje się celowe dalsze rozwijanie i wdrażanie tego typu badań doświadczalnych złożonych przestrzennych układów konstrukcyjnych, w tym elementów wysokociśnieniowych kotłów.

## Literatura cytowana w tekście

1. W. JARZĘBOWSKI, Z. ORŁOŚ, K. TOMASZEWSKI, *Niektóre problemy technologii wykonywania modeli przestrzennych do badań elastooptycznych*, Materiały VI Sympozjum doświadczalnych badań w mechanice ciała stałego, Warszawa, 19 - 20 września 1974.
2. W. KOWALSKI, Z. ORŁOŚ, M. SZOPA, K. TOMASZEWSKI, *Elastooptyczne badania modeli zbiorników ciśnieniowych*, Materiały VI Sympozjum doświadczalnych badań w mechanice ciała stałego, Warszawa 1974.

## Резюме

### ПРОЧНОСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ

В работе описываются, проведенные авторами, модельные испытания сосудов давления. Модели, сделанные из оптически чувствительного материала на основе эпоксидной смолы, представляли собой соединения корпуса сосуда с патрубками. Для исследований использовался поляризационно-оптический метод замораживания напряжений а также тензометрические измерения и разрушающее испытание. Приводятся некоторые подробности технологии изготовления моделей и описание испытательного стенда. Обсуждается метод оценки прочности сосудов давления по результатам модельных испытаний.

## S u m m a r y

## STRENGTH INVESTIGATIONS OF PRESSURE VESSEL MODELS

The authors describe model tests performed on pressure vessel models. The models made of an optically sensitive material, based on epoxy resins, represented the nozzle — thick valled cylinder joint.

The photoelastic stress — freezing method, the strain gauge measurements, and the destructive test were used in the experiments. Some details concerning the models fabrication method and description of test stands were given, and the method of the strength estimation of pressure vessels on the ground of model tests was discussed.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WARSZAWA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 21 stycznia 1975 r.*

---