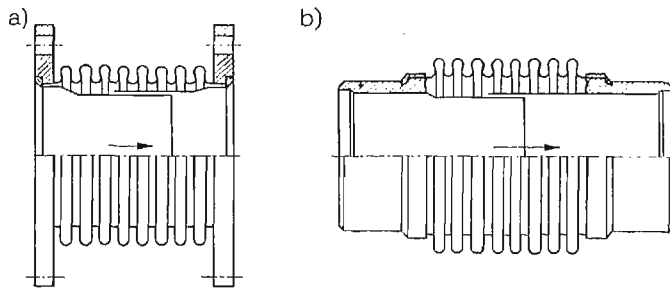


BADANIA ELASTOPTYCZNE MIESZKÓW
KOMPENSACYJNYCH Z PIERŚCIENIAMI WZMACNIAJĄCYMI

CYPRIAN KOMORZYCKI (LUBLIN), JACEK STUPNICKI (WARSZAWA)

1. Wstęp

Mieszki sprężyste (rys. 1), w miarę postępu technologii ich wykonania, są coraz częściej stosowane jako kompensatory przemieszczeń w różnego typu rurociągach, pracujących w zmiennych warunkach termicznych.

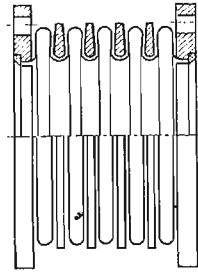


Rys. 1. Kompensatory mieszkowe: a) z zakończeniem kołnierzowym, b) z zakończeniem rurowym.

Analiza jakościowa wykazuje, że możliwości stosowania mieszków sprężystych jako układów kompensujących przemieszczenia znacznie maleją, gdy mamy do czynienia z wysokimi ciśnieniami i dużymi średnicami rurociągów. Nowe możliwości w tym zakresie pojawiły się wraz z zastosowaniem mieszków o powłoce wzmocnionej pierścieniami, znajdującymi się we wgłębieniach powłoki¹⁾ (rys. 2).

Ogólnie słuszna idea zastosowania pierścieni wzmocniających w kompensatorach mieszkowych, napotyka przy praktycznej realizacji na szereg trudności technologicznych i obliczeniowych [1]. Badania elastooptyczne są jedną z metod doświadczalnych, które mogą być zastosowane do analizy wytrzymałościowej kompensatorów mieszkowych z pierścieniami wzmocniającymi dla różnego rodzaju obciążeń właściwych kompensatorom, a w tej liczbie również obciążeń niesymetrycznych. Występujące wzajemne oddziaływanie pierścienia wzmocniającego i mieszka czynią z kompensatora obiekt trudny do modelowania.

¹⁾ Praca nt. „Wpływ podatności pierścieni wzmocniających na pracę kompensatorów mieszkowych” w MTS



Rys. 2. Kompensator mieszkowy z pierścieniami wzmacniającymi: 1-mieszek, 2-pierścień wzmacniający

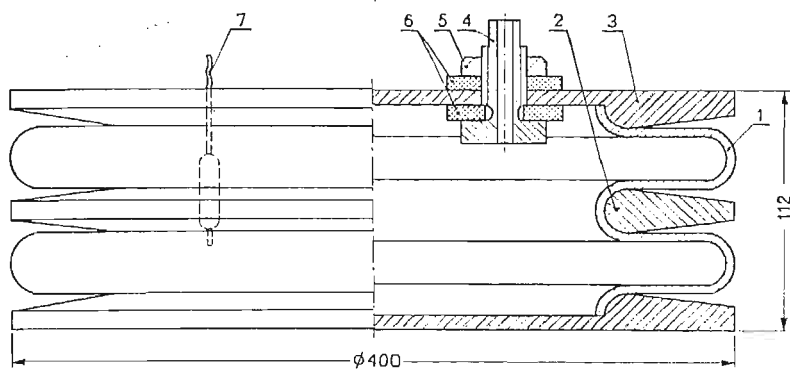
Ograniczeniem w badaniach elastoptycznych kompensatorów mieszkowych z pierścieniami wzmacniającymi jest mała grubość ścianki mieszka w porównaniu z pozostałymi wymiarami, co nastręcza trudności wykonawcze. Innym ograniczeniem ogólniejszej natury, jest zastosowanie metody zamrażania naprężeń do zagadnienia nieliniowego. Polega ono na tym, że otrzymane wyniki badań opisują tylko jeden wybrany stan pracy konstrukcji, a uzyskanie informacji dla innych stanów pracy jest możliwe po wykonaniu nowych modeli elastoptycznych.

2. Technika badań doświadczalnych

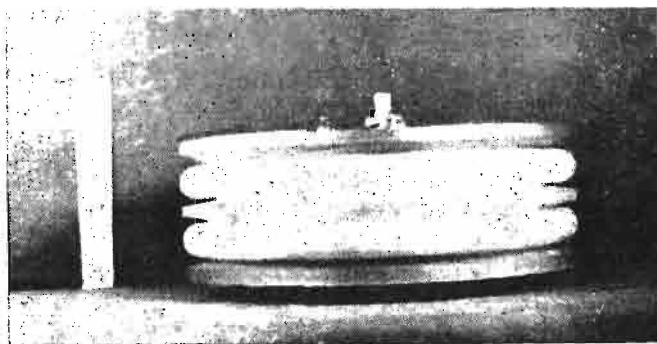
Badania elastoptyczne konstrukcji przestrzennych metodą zamrażania naprężeń, jakkolwiek zaliczane już do badań rutynowych, zawsze posiadają na etapie wykonania modelu, stanowiska badawczego oraz przeprowadzenia samego doświadczenia wiele cech indywidualnych, uwarunkowanych wielkością i kształtem konstrukcji oraz charakterem i wielkością występujących obciążeń [2]. W przypadku badań elastoptycznych kompensatora mieszkowego z pierścieniami wzmacniającymi szczególnych zabiegów wymagały:

- na etapie wykonania modelu: zachowanie stałej grubości ścianki mieszka, zapewnienie dobrego przylegania mieszka i pierścieni wzmacniających bez napięć w stanie nieobciążonym, szczelność modelu, płaskość pokryw modelu;
- na etapie przygotowania stanowiska badawczego: maksymalne wyeliminowanie ciężaru własnego modelu, zachowanie stałości ciśnienia wewnętrznego z wysokością modelu, umożliwienie zadawania dowolnych obciążeń ciśnieniem i przemieszczeniem, zabezpieczenie przed wystąpieniem naprężeń termicznych;
- na etapie prowadzenia doświadczenia: zabezpieczenie możliwie równomiernego wzrostu i zmniejszania temperatury modelu.

2a. Wykonanie modelu. Poszczególne elementy modelu kompensatora wykonane zostały z żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem A_1 [2]. Kompletny model przedstawia rys. 3, a jego widok rys. 4. Dwie pokrywy 3 z ukształtowanymi półpierścieniami zamykają mieszek 1 i są z nim sklejone żywicą epoksydową. Pierścień wzmacniający 2 po rozcięciu i nałożeniu na mieszek został również sklejony żywicą. W pokrywie górnej zamontowany jest króciec 4, umożliwiający doprowadzenie oleju i termopara 7.



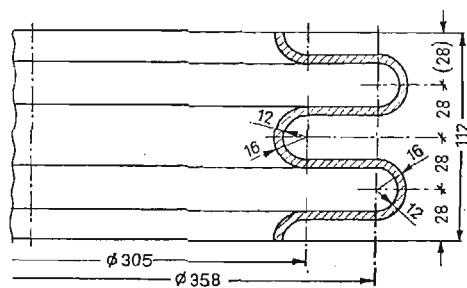
Rys. 3. Model kompensatora: 1 — mieszek, 2 — pierścień wzmacniający, 3 — pokrywa, 4 — króciec, 5 — nakrętka, 6 — podkładki uszczelniające, 7 — termopara.



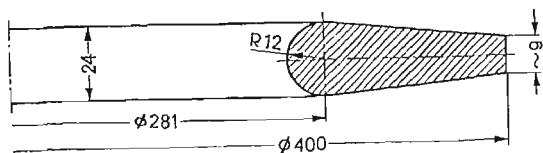
Rys. 4. Kompensator mieszkowy z pierścieniami wzmacniającymi.

Kształt i wymiary mieszka przyjęte do badań elastoptycznych przedstawia rys. 5, a pierścienia wzmacniającego rys. 6.

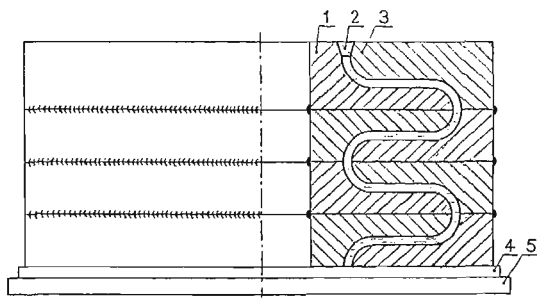
Elementami wyjściowymi do wykonania mieszka, pierścieni wzmacniających i pokrywy były pramodele pierścienia wzmacniającego i jednej półfali powłoki mieszkowej, wykonane z duralu PA5. Dzieloną formę gumową do odlewania mieszka w całości z odpowiednimi naddatkami na obróbkę mechaniczną przedstawia rys. 7.



Rys. 5. Mieszek wykonany z żywicy epoksydowej Epidian 5.



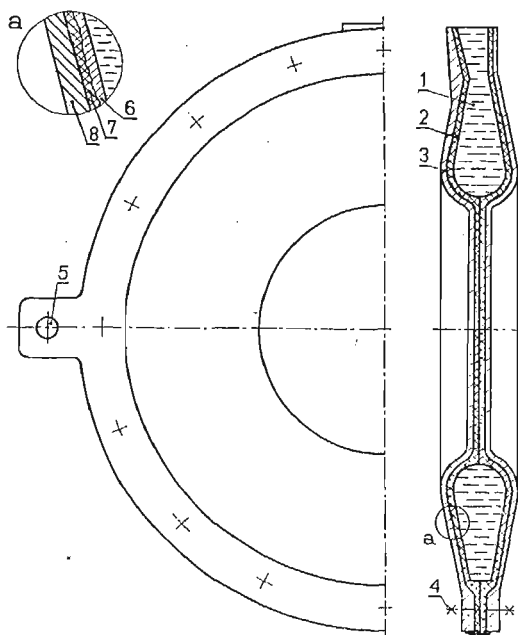
Rys. 6. Pierścień wzmacniający wykonany z żywicy epoksydowej Epidian 5.



Rys. 7. Kompletna forma gumowa przygotowana do odlewania mieszka: 1 — część wewnętrzna formy (guma silikonowa M33), 2 — mieszek (żywica), 3 — część zewnętrzna formy (guma M33), 4 — podkładka (polimetakrylan metylu), 5 — podstawa drewniana.

Pierścienie wzmacniające zostały odlane w formie z gumy silikonowej, wzmocnionej powłoką z żywicy zmieszanej z gipsem, przedstawionej na rys. 8. Dla mieszka i pierścienia przewidziano nadatki na obróbkę mechaniczną.

Grubość warstwy gumy 3 zależy od żądanej grubości pokrywy. Pokrywa z połówką pierścienia wzmacniającego była pasowana z mieszkiem na drodze obróbki mechanicznej.



Rys. 8. Forma do odlewania pierścieni wzmacniających: 1 — pierścień (żywica), 2, 3 — część lewa i prawa formy dzielonej, 4 — śruby łączące, 5 — kołki centrujące, 6 — warstwa gumy, 7 — przekładka z tkaniny, 8 — warstwa żywicy epoksydowej z wypełniaczem w postaci gipsu.

Pokrywy kompensatora mieszkowego zostały wykonane w formie, dla której bazą była powłoka formy, przygotowanej do odlewania pierścieni wzmacniających (rys. 9).

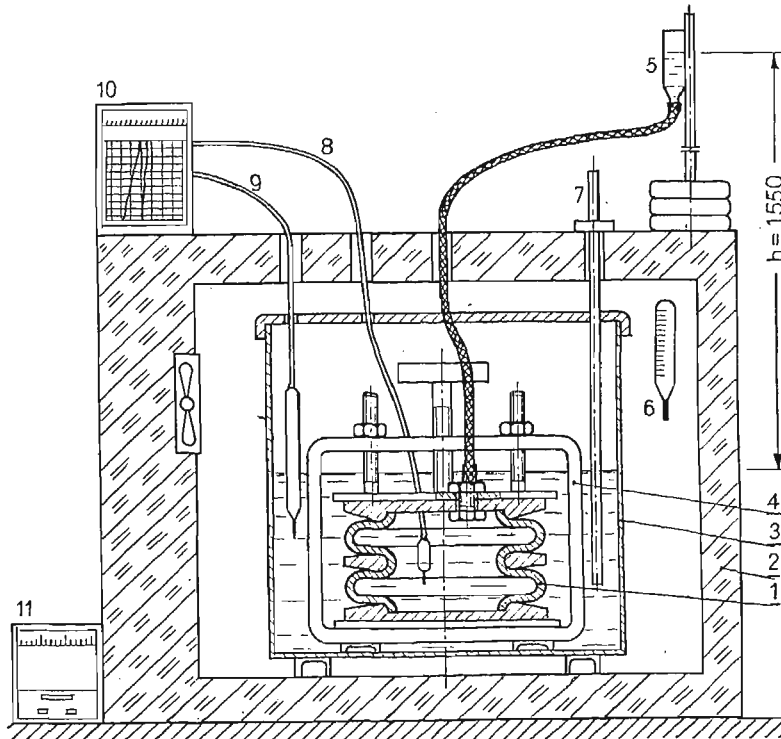


Rys. 9. Forma do odlewania pokryw: 1 — pokrywa (żywica), 2 — połówka formy gipsowej do odlewania pierścieni (patrz rys. 8), 3 — warstwa gumy.

Końcowym etapem przygotowania modelu kompensatora do badań elastoptycznych było zamontowanie termopary i króćca do napełniania kompensatora olejem oraz sklejanie żywicą poszczególnych elementów i sprawdzenie szczelności.

2b. Stanowisko badawcze. Schemat stanowiska do badań elastoptycznych kompensatorów mieszkowych metodą zamrażania naprężeń przedstawia rys. 10.

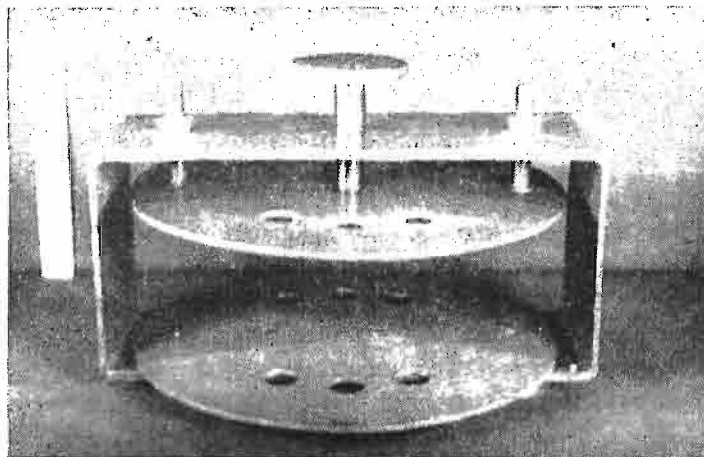
Przygotowane stanowisko badawcze umożliwia realizację dowolnych obciążeń kompensatora mieszkowego przemieszczeniem osiowym i ciśnieniem wewnętrznym oraz



Rys. 10. Schemat stanowiska do badań elastoptycznych kompensatorów: 1 — kompensator mieszkowy, 2 — komora cieplna, 3 — pojemnik, 4 — rama obciążająca, 5 — zbiornik z olejem, 6 — termometr rtęciowy, 7 — wskaźnik poziomu oleju, 8, 9 — termopary, 10 — rejestrator temperatury, 11 — automatyczny regulator temperatury.

umożliwia realizację dowolnie wybranego programu nagrzewania i chłodzenia modelu oraz kontrolę rozkładu i zmian temperatury.

Kompensator mieszkowy 1 wraz z ramą obciążającą 4 (rys. 11) umieszczono w pojemniku 3, który znajdował się w komorze cieplnej 2. Do wnętrza kompensatora doprowa-



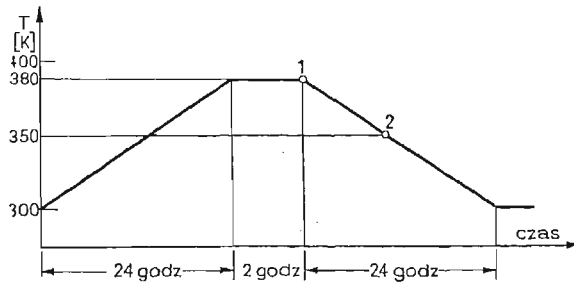
Rys. 11. Rama obciążająca.

dzony był olej przewodem grunowym ze zbiornika oleju 5. Różnica poziomów oleju w zbiorniku 5 i pojemniku 3 wyznaczała wielkość ciśnienia wewnętrznego w kompensatorze ($p = h \cdot \gamma$; h — różnica poziomów oleju, γ — ciężar właściwy oleju). Olej wypełniający pojemnik 3 eliminował w znacznym stopniu (około 80%) wpływ ciężaru własnego kompensatora na stan naprężeń oraz powodował, że ciśnienie hydrostatyczne p wewnątrz mieszka pozostawało stałe z jego wysokością. Temperaturę oleju wewnątrz kompensatora podawała termopara 8, a temperaturę na zewnątrz mieszka termopara 9. Rejestrator 10 dokonywał ciągłego zapisu temperatur, przekazywanych przez termopary. Termometr rtęciowy 6 wskazywał temperaturę wewnątrz komory cieplnej. Nadajnik programu temperatury 11 sterował szybkością ogrzewania i chłodzenia modelu. Rama obciążająca 4 (rys. 11) umożliwiała realizację obciążeń kompensatora przemieszczeniem osiowym i ciśnieniem wewnętrznym.

2c. Przebieg badań. Duża pojemność cieplna układu i małe przewodnictwo cieplne oleju i żywicy epoksydowej wymagały programu zamrażania, przedstawionego na rys. 12.

Jeden z modeli poddano obciążeniu przemieszczeniem osiowym 10 mm (2,5 mm w przeliczeniu na jedną półfałę), a drugi obciążono ciśnieniem wewnętrznym $p = \gamma \cdot h = 8 \cdot 10^{-3} \text{ MN/m}^3 \cdot 1,55 \text{ m} = 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ MN/m}^2$. Dla uniknięcia dodatkowych obciążeń, wynikających z dużych różnic współczynników rozszerzalności cieplnej stali (rama obciążająca) i żywicy epoksydowej (kompensator) w przypadku obciążenia kompensatora ciśnieniem wewnętrznym, wprowadzono poprawkę w postaci luzu Δl pomiędzy pokrywą górną kompensatora i płytą górną ramy obciążającej, równą

$$\Delta l = l \cdot \Delta T(\alpha_2 - \alpha_{st})$$



Rys. 12. Program zamrażania stanu naprężeń (odkształceń): 1 — obciążenie modelu kompensatora przez mieszczeniem lub ciśnieniem (rozpoczęcie zamrażania), 2 — koniec zamrażania.

gdzie: l — długość kompensatora ($l = 132$ mm)

$T = T_z - T_0$; T_z — temperatura zamrażania, T_0 — temperatura otoczenia; ($\Delta T = 100$ K)

$\alpha_z = 12,5 \cdot 10^{-5}$ 1/K — współczynnik rozszerzalności cieplnej żywicy,

$\alpha_{st} = 1,25 \cdot 10^{-5}$ 1/K — współczynnik rozszerzalności cieplnej stali

Wielkość luzu: $\Delta l = 132 \cdot 100 (12,5 \cdot 10^{-5} - 1,25 \cdot 10^{-5}) \cong 1,5$ mm.

W przypadku obciążenia kompensatora przemieszczeniem osiowym, płytę górną ramy obciążającej przesuwamy w temperaturze górnej zamrażania o daną wielkość przez pokręcenie śruby, licząc przemieszczenie od momentu zetknięcia płyty z kompensatorem. Uwzględnienie więc luzu w tym przypadku jest zbyteczne.

3. Opracowanie wyników badań

Jak wykazały badania wstępne żywica epoksydowa Epidian 5 z utwardzaczem A_1 posiada w temperaturze zamrażania 383 K (110°C) moduł Younga $E = 16$ MPa. Dla próbki o grubości $\delta_w = 3$ mm wyciętej z modelu z zamrożonym stanem odkształceń dla światła żółtego o długości fali $\lambda_w = 578$ nm stałą modelową naprężeniową $f_{\sigma_w} = 9,25 \cdot 10^{-2}$ MN/m² · rz.iz.

Najbardziej wyężonym elementem kompensatora jest mieszek, a ekstremalne naprężenia występują na jego swobodnych powierzchniach. Określenie naprężeń głównych, decydujących o wyężeniu materiału na powierzchniach swobodnych mieszka sprowadza się, wobec znajomości ich kierunków, do wyznaczenia rozkładu izochrom w płytkach wyciętych w płaszczyźnie południkowej (rys. 13).

Wielkość naprężeń na powierzchniach swobodnych mieszka w płaszczyźnie południkowej wyznaczamy z podstawowego równania elastoptyki:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = f_\sigma \cdot m,$$

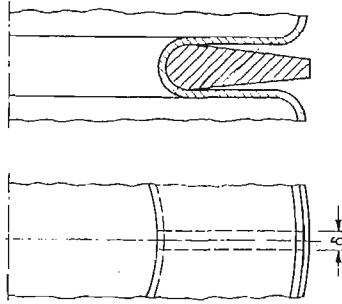
gdzie: σ_1, σ_2 — naprężenia główne ($\sigma_1 \geq \sigma_2$)

f_σ — stała modelowa naprężeniowa ($f_\sigma = f_{\sigma_w} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_w} \cdot \frac{\delta}{\delta_w}$);

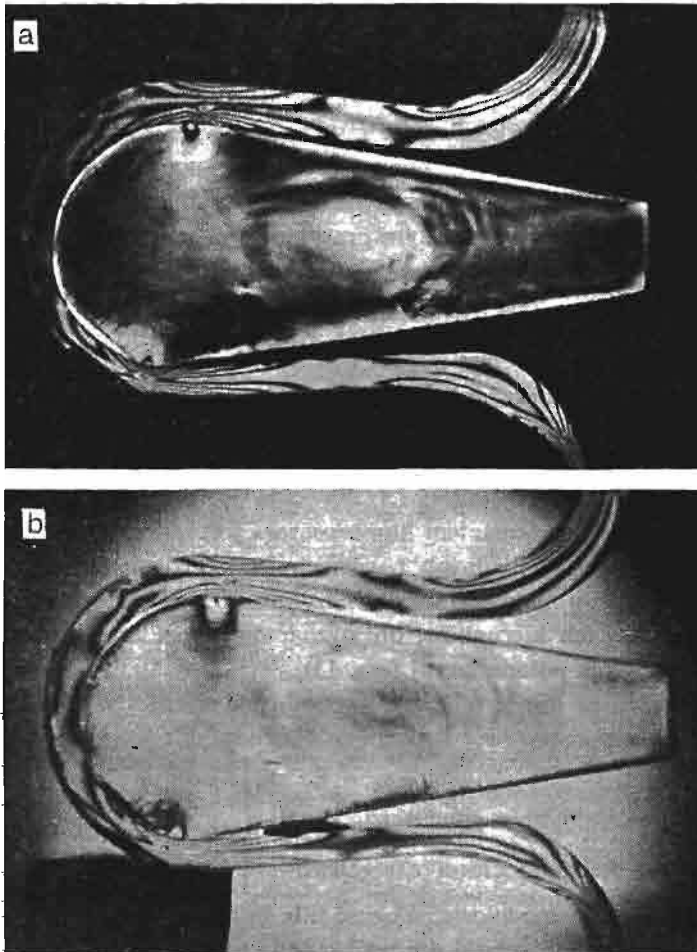
$f_{\rho_w}, \lambda_w, \delta_w$, — stała modelowa, długość fali świetlnej, grubość płytki dla próbki wzorcowej;

$f_\sigma, \lambda, \delta$, — stała modelowa, długość fali światła, grubość dla płytki badanej;

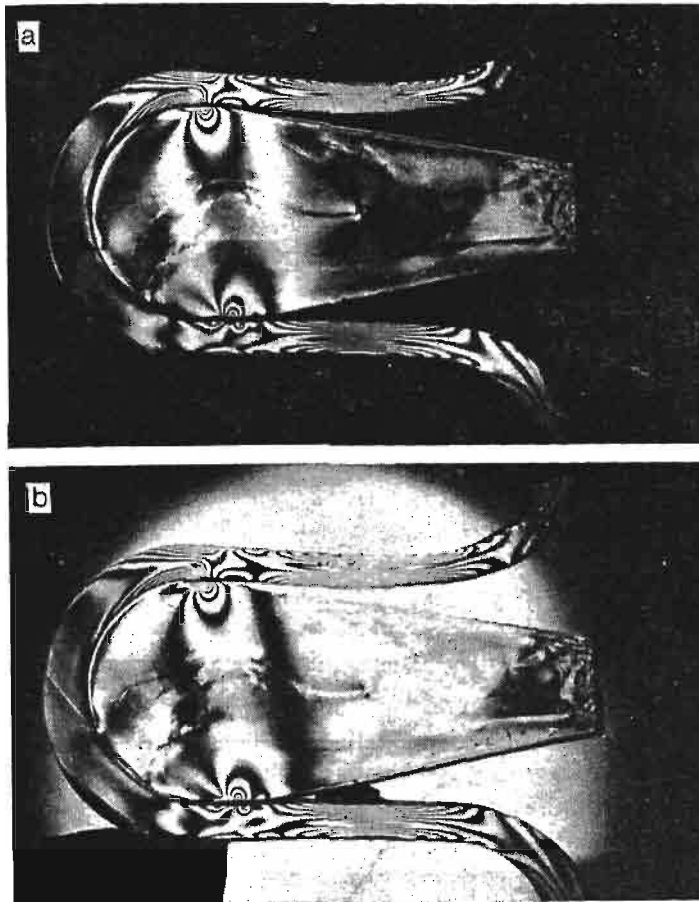
m — rząd izochromy.



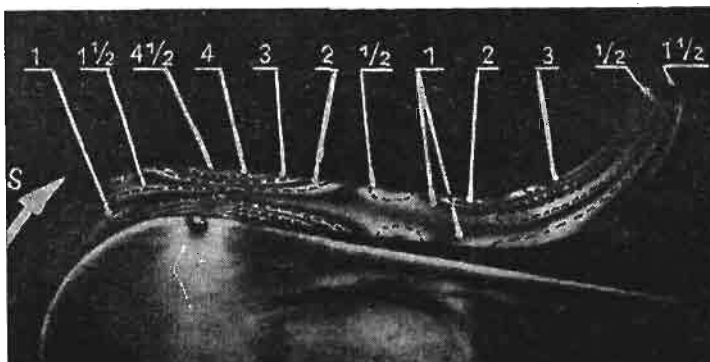
Rys. 13. Płyta o grubości wycięta z kompensatora przeznaczonego do badań elastoptycznych.



Rys. 14. Obrazy izochrom dla kompensatora obciążonego przemieszczeniem osiowym 2,5 mm/1 półfale:
a) izochromy całkowite, b) izochromy półówkowe.



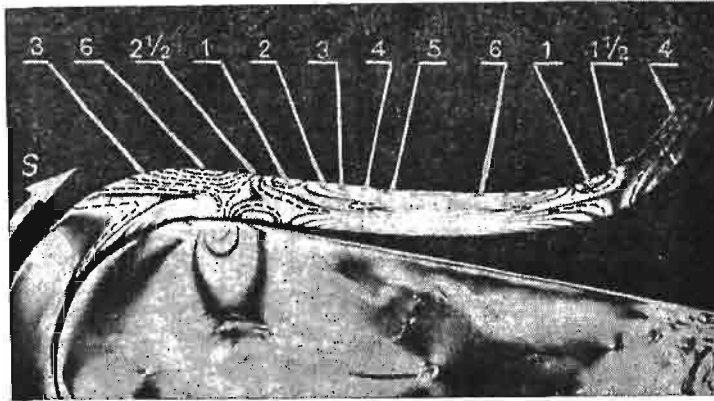
Rys. 15. Obrazy izochrom dla kompensatora obciążonego ciśnieniem wewnętrznym $p = 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ MN/m}^2$:
 a) izochromy całkowite, b) izochromy połówkowe.



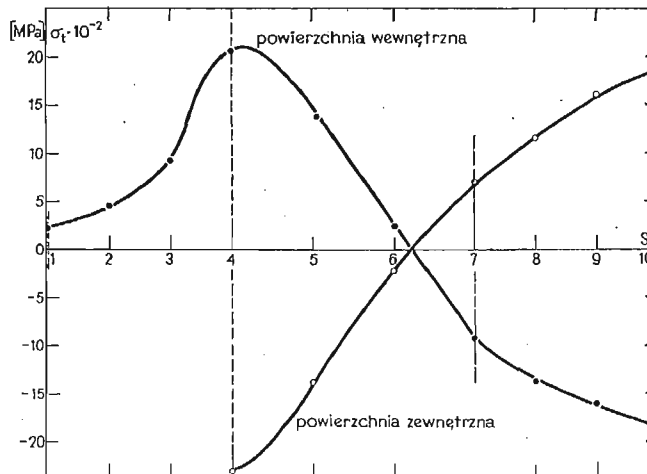
Rys. 16. Obraz zbiorczy izochrom dla kompensatora obciążonego przemieszczeniem osiowym 2,5 mm / 1półfałę.

Obrazy izochrom w wycinku kompensatora mieszkowego z pierścieniem wzmacniającym dla przypadków obciążenia przemieszczeniem osiowym i ciśnieniem wewnętrznym przedstawiają rys. 14 i 15, a obrazy zbiorcze izochrom (całkowitych i połówkowych) pokazują rys. 16 i 17.

Wyniki obliczeń w postaci wykresów naprężeń na powierzchniach swobodnych wycinków mieszka (rys. 16, 17) przedstawione są w postaci wykresów, przedstawionych na rys. 18 i 19.



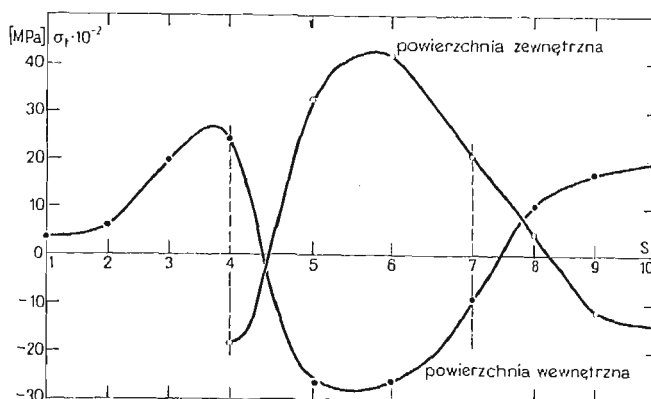
Rys. 17. Obraz zbiorczy izochrom dla kompensatora obciążonego ciśnieniem wewnętrznym $p = 1,24 \times 10^{-2} \text{ MN/m}^2$.



Rys. 18. Naprężenia południkowe na powierzchniach swobodnych mieszka obciążonego przemieszczeniem osiowym 2,5 mm/1półfałę.

4. Dyskusja otrzymanych wyników i ocena błędów

Przedstawione naprężenia na powierzchniach swobodnych mieszka (rys. 18, 19) są w przeważającej części efektem zginania powłoki mieszka w płaszczyźnie południkowej. Mają one decydujący udział w wyteżeniu materiału, ponieważ naprężenia obwodowe są



Rys. 19. Naprężenia południkowe na powierzchniach swobodnych mieszka obciążonego ciśnieniem wewnętrznym $p = 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ MN/m}^2$.

stosunkowo małe, dzięki zastosowaniu pierścieni wzmacniających, co można potwierdzić przez wycięcie płytki obwodowej. Określenie naprężeń obwodowych na drodze elastooptycznej przez badanie podpłytek jest jednak kłopotliwe ze względu na małą wartość tych naprężeń.

Dla obciążenia kompensatora przemieszczeniem osiowym największe co do wartości bezwzględnej naprężenia o kierunku południkowym występują w środku torusa zewnętrznego mieszka i w miejscu wchodzenia w kontakt powłoki mieszka z pierścieniem wzmacniającym. Dla przypadku obciążenia ciśnieniem wewnętrznym największe naprężenia występują w środku części płytowej półfali mieszka, w części środkowej torusa zewnętrznego oraz w miejscu wchodzenia w kontakt mieszka z pierścieniem wzmacniającym.

Zasady przenoszenia wyników pomiarów modelu na konstrukcję rzeczywistą (obiekt) określa teoria podobieństwa modelowego. Nieliniowość procesu współpracy mieszka z pierścieniem wzmacniającym stwarza szczególne wymagania zachowania postaci modelu i konstrukcji rzeczywistej w trakcie obciążania i po obciążeniu; zachowanie podobieństwa badanych zjawisk prowadzi do konieczności zachowania podobieństwa zmiany postaci modelu i obiektu. W badanej konstrukcji kompensatora zupełnie inne równania opisują odkształcenia mieszka (zgięciowa teoria powłok), a inne masywnego pierścienia. Zarówno obszar oddziaływań pomiędzy mieszkem a pierścieniem jak i rozkład tych oddziaływań zależy od odkształceń obydwu elementów. Dla punktów dostatecznie odległych od obszaru kontaktu wpływ, wynikający ze zmiany obszaru kontaktu, może być pominięty. Takie założenie można poczynić jeśli ograniczamy się do wyznaczania naprężeń w punktach mieszka o największym wyężeniu materiału, a więc dla punktów torusa zewnętrznego lub punktów powierzchni swobodnych środka części płytowej.

Przy powyższych założeniach, zgodnie z teorią Buckingham'a, dla materiału izotropowego podlegającego prawu Hooke'a, naprężenia w punkcie o współrzędnych (x, y, z) można wyrazić następująco [4]:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{p}{E} \cdot f_1\left(\frac{x}{l}, \frac{y}{l}, \frac{z}{l}, \nu, \dots\right) + \frac{\nu}{l} \cdot f_2\left(\frac{x}{l}, \frac{y}{l}, \frac{z}{l}, \nu, \dots\right),$$

gdzie: p — ciśnienie wewnętrzne w kompensatorze,
 l — dowolny wymiar liniowy,
 v — przemieszczenie osiowe (przemieszczenie jako obciążenie),
 E — moduł Younga,
 ν — liczba Poissona'a.

Jeśli stosunki odpowiednich wielkości, dla modelu i obiektu, w funkcjach f_1 i f_2 są równe (w tym i liczba Poissona'a) to naprężenia w dowolnym punkcie modelu i obiektu można przedstawić:

$$\frac{\sigma}{E} = C_1 \cdot \frac{p}{E} + C_2 \cdot \frac{v}{l}$$

gdzie: C_1, C_2 , — stałe niezależne od obciążeń jednakowe dla modelu i obiektu.

Stale C_1 i C_2 można wyznaczyć poddając niezależnie obciążeniom p i v dwa jednakowe modele. Wtedy dla obciążenia modelu ciśnieniem spełniony będzie warunek:

$$\frac{\sigma_m}{E_m} = C_1 \cdot \frac{p_m}{E_m},$$

a dla obciążenia przemieszczeniem

$$\frac{\sigma_m}{E_m} = C_2 \cdot \frac{v_m}{l_m}.$$

Pisząc analogiczne zależności dla obiektu i uwzględniając równość odpowiednich statycznych otrzymujemy proste wzory umożliwiające przenoszenie wyników z modelu na konstrukcję rzeczywistą:

a) dla obciążenia ciśnieniem

$$\sigma_0 = \frac{p_0}{p_m} \cdot \sigma_m$$

b) dla obciążenia przemieszczeniem

$$\sigma_0 = \frac{E_0}{E_m} \cdot \frac{v_0}{v_m} \cdot \frac{l_m}{l_0} \cdot \sigma_m$$

Jeśli przyjąć, że obiekt ma te same wymiary co model i zadane obciążenia przemieszczeniem są jednakowe dla modelu i obiektu to naprężenia w konstrukcji rzeczywistej i modelu pozostają do siebie w takim stosunku jak moduły sprężystości E_0/E_m , naprężenia zaś od obciążenia ciśnieniem pozostają do siebie w stosunku równym skali ciśnień p_0/p_m .

Na błąd wyników pomiarów elastooptycznych wpływa błąd samej metody pomiaru oraz błąd wynikający z konieczności przenoszenia wyników pomiarów z modelu na konstrukcję rzeczywistą. Błąd względny możemy obliczyć metodą pochodnej logarytmicznej przyjmując, że E_0 jest wielkością o błędzie pomijalnym, zaś $\Delta E_m/E_m = 0,05$ (z pomiarów testowych), a obiekt pod względem wymiarów geometrycznych i wielkości przemieszczeń jest wiernym odwzorowaniem modelu. Otrzymamy wtedy:

$$\frac{\Delta \sigma_0}{\sigma_0} = \pm \left(\left| \frac{\Delta E_m}{E_m} \right| + \left| \frac{\Delta \sigma_m}{\sigma_m} \right| \right) \cdot 100\%$$

Błąd $\Delta\sigma_m/\sigma_m$ obliczony metodą pochodnej logarytmicznej na bazie równania podstawowego elastoptyki przytoczonego w opracowaniu wyników wynosi $\Delta(\sigma_1 - \sigma_2)/(\sigma_1 - \sigma_2) = \pm 0,055$. Stąd błąd względny określenia naprężeń w punktach obiektu (mieszka rzeczywistego) dostatecznie odległych od obszaru kontaktu i będącego pod względem geometrycznym wiernym odwzorowaniem modelu wyniesie

$$\frac{\Delta\sigma_0}{\sigma_0} = \pm 10,5\%.$$

5. Wnioski

Przeprowadzone badania elastoptyczne dostarczyły cennych informacji o wytrzymałościowych warunkach pracy kompensatora mieszkowego z pierścieniami wzmacniającymi. Uzyskane wyniki i poczynione w trakcie badań obserwacje pozwalają sformułować następujące wnioski:

1) W przypadku obciążenia kompensatora ciśnieniem wewnętrznym ekstremalne naprężenia występują w środku części płytowej na swobodnej powierzchni wewnętrznej.

2) W przypadku obciążenia kompensatora przemieszczeniem osiowym ekstremalne naprężenia występują w części środkowej torusa zewnętrznego i w obszarze wchodzenia mieszka w kontakt z pierścieniem.

3) Zgodnie z zasadą superpozycji naprężenia w punktach powłoki mieszkowej dostatecznie odległych od obszaru kontaktu mieszka i pierścienia mogą być wyznaczone dla dowolnej kombinacji obciążeń ciśnieniem i przemieszczeniem na podstawie wyników otrzymanych oddzielnie dla obciążenia kompensatora ciśnieniem i przemieszczeniem.

4) W warunkach prowadzonych badań, dla obciążenia kompensatora ciśnieniem wewnętrznym, obserwowane było przyleganie mieszka na całej powierzchni torusa pierścienia zaś dla obciążenia przemieszczeniem (ściskanie), zgodnie z oczekiwaniem mieszki i pierścienia nie przylegały w części środkowej torusa wewnętrznego.

5) Jeśli wyłączyć niewielki obszar spiętrzenia naprężeń w obszarze przechodzenia pierścienia wzmacniającego z części stożkowej w torusową to należy zauważyć, że wartości naprężeń w torusie wewnętrznym są pomijalne w porównaniu z naprężeniami w pozostałych fragmentach mieszka.

6) Zastosowana w badaniach technologia wykonania modeli elastoptycznych wykazała, że osiągnięcie ostatecznej grubości ścianki mieszka 3 mm lub większej i średnicy do 400 mm nie jest trudne.

7) Gdyby zaszła konieczność badania kompensatorów o bardzo cienkich powłokach mieszkowych (np. ułanków milimetra) to obok oczywistych trudności wykonawczych wystąpiłyby trudności w badaniach naprężeń, a przede wszystkim naprężeń obwodowych, których udział w wyężeniu materiału przy obciążeniu ciśnieniem zwiększa się w miarę zmniejszania się grubości ścianki mieszka.

8) Warunki brzegowe w modelowych badaniach elastoptycznych są bliskie rzeczywistym, a uwzględnienie innych rodzajów obciążeń niż osiowo-symetryczne nie zmieniłoby w zasadniczy sposób metodyki badań.

9) Badania elastoptyczne mogą być stosowane jako samodzielna lub uzupełniająca metoda analizy stanu naprężeń i przemieszczeń w kompensatorach mieszkowych z pierścieniami wzmacniającymi.

Literatura cytowana w tekście

1. L. D. ŁUGANCEW, *Issledowanie naprażenno-deformirowannogo sostojania silfonnogo kompensatora wysokowo dawlenia*, W: Raszety na procznost. Wyp. 17, Moskwa, Maszynostrojenie, 1976.
2. I. SŁOWIKOWSKA, A. KOZŁOWSKI, *Elastoptyczne własności krajowych żywic epoksydowych*, cz. I, Polimery, 9, 15 (1970).
3. R. S. DOROSZKIEWICZ, *Elastoptyka*, Warszawa—Poznań, PWN, 1975.
4. A. DIURELLI, U. RAILI, *Wwiedienije w fotomechaniku*, Moskwa, Izd. Mir, 1970.

Резюме

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЕНСАТОРОВ СИЛЬФОННОГО ТИПА С УКРЕПЛЯЮЩИМИ КОЛЬЦАМИ

В работе представлено результаты исследований компенсаторов сильфонного типа с укрепляющими кольцами проведены поляризационно-оптическим методом.

Полученные результаты исследований доказали большую пригодность поляризационно-оптических методов для анализа условий работы компенсаторов сильфонного типа.

Summary

PHOTOELASTIC STUDY OF THE BELLOW WITH REINFORCING RINGS

Experimental analysis of stress and deformation of the bellows with reinforcing rings, used as compensators of thermal expansion in pipelines has been performed. Using the photoelastic freezing method and models made of epoxy resin the stress distribution, effective stresses, contact zones between the shell and the rings for inner pressure as well as for displacements has been determined.

Praca została złożona w Redakcji dnia 3 lutego 1981 roku