

BADANIA ODKSZTAŁCEŃ I NAPRĘŻEŃ TERMOSPŘĘŻYSTYCH NA MODELACH  
EPOKSYDOWYCH METODĄ TENSOMETRII ELEKTROREZYSTENCYJNEJ

ZBIGNIEW ORŁOŚ, KAZIMIERZ TOMASZEWSKI (WARSZAWA)

Streszczenie

W pracy opisano badania odkształceń termosprężystych przeprowadzonych metodą tensometrii elektrozystencyjnej na modelach wykonanych z tworzywa epoksydowego. Badania realizowano w dwu etapach. W pierwszym wyznaczono odkształcenia całkowite, w drugim określono odkształcenia pozorne. Różnica wymienionych odkształceń stanowiła poszukiwane odkształcenia termosprężyste. Przeprowadzono analizę obciążeń cieplnych modelu oraz towarzyszących im odkształceń i naprężeń termosprężystych w stanie stacjonarnym i niestacjonarnym przy dwóch prędkościach zmian temperatury ośrodka obciążającego cieplnie model.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- $E$  moduł sprężystości podłużnej  
 $\nu$  współczynnik Poissona  
 $\alpha$  współczynnik rozszerzalności cieplnej liniowej  
 $T$  temperatura  
 $\Delta T$  przyrost temperatury  
 $t$  czas  
 $\varepsilon$  odkształcenie jednostkowe  
 $\varepsilon_c$  odkształcenie całkowite  
 $\varepsilon'$  odkształcenie pozorne  
 $\sigma$  naprężenie  
 $\alpha_1, \alpha_2$  współczynniki przyjmowania ciepła  
 $\lambda$  przewodność cieplna  
 $\rho$  gęstość  
 $c_p$  ciepło właściwe  
 $a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$  współczynnik wyrównywania temperatury  
 $(Bi)_1 = \frac{l \cdot \alpha_1}{\lambda}, (Bi)_2 = \frac{l \cdot \alpha_2}{\lambda}$  liczby Biota  
 $Fo = \frac{a \cdot t}{l^2}$  liczba Fouriera  
 $l$  charakterystyczny rozmiar modelu  
 $k$  stała tensometru  
 $\beta$  współczynnik termicznych zmian rezystancji drucika tensometru  
 $\gamma$  współczynnik odkształceń pozornych

## Wykaz indeksów do oznaczeń

- m* model  
*p* prototyp; kierunek podłużny  
*r* kierunek obwodowy  
*x, y, z* współrzędne prostokątne  
*f* plyn  
*w* ścianka  
 1 ośrodek czynny obciążeń cieplnych (alkohol etylowy)  
 2 ośrodek bierny (powietrze)  
*cz* czujnik tensometryczny

## 1. Wstęp

Analiza odkształceń i naprężeń termosprężystych prowadzona jest zarówno na drodze teoretycznej jak i doświadczalnej. Prace teoretyczne [1], [2] oraz obliczenia wykonywane coraz częściej przy wykorzystaniu metody elementów skończonych [3], [4] obejmują dotąd przykłady wyznaczania naprężeń w układach o prostej geometrii, a w bardzo małym stopniu rozpatrują zagadnienia przestrzenne termosprężystości. Rozwiązania teoretyczne tych ostatnich są dość skomplikowane, a obliczenia wymagają dużego nakładu pracy.

Wśród prac doświadczalnych mających najszersze znaczenie praktyczne w badaniach odkształceń i naprężeń termosprężystych znajduje się metoda elastooptyczna [5], [6] i metoda tensometrii elektrozestancyjnej. Metoda tensometryczna stosowana jest do badań odkształceń termosprężystych obiektów rzeczywistych (prototypów) [7] i w coraz szerszym stopniu w badaniach modelowych [8], [9], [10]. Jako materiał modelu stosuje się tu żywice epoksydowe charakteryzujące się niską przewodnością cieplną  $\lambda$  i wysokim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej  $\alpha$  w stosunku do obiektów prototypowych.

## 2. Założenia badań modelowych

Teoria podobieństwa stawia badaniom modelowym odkształceń i naprężeń termosprężystych szereg warunków, które winny być spełnione by zostało zrealizowane podobieństwo cieplne i podobieństwo pól naprężeń między modelem i prototypem. Rozkłady temperatur w modelu i prototypie przy określonych warunkach brzegowych będą podobne, jeśli odpowiednie liczby bezwymiarowe będą jednakowe dla modelu i prototypu [6]. I tak liczby Biota od strony ośrodka czynnego obciążającego cieplnie model i prototyp

$$(1a) \quad (B_i)_m = \frac{l_m \cdot \alpha_{1m}}{\lambda_m}$$

$$(1b) \quad (B_i)_p = \frac{l_p \cdot \alpha_{1p}}{\lambda_p}$$

winny być równe

$$(1c) \quad (B_i)_m = (B_i)_p$$

i analogicznie od strony ośrodka zwykle biernego, otaczającego model i prototyp.

W warunkach badań zmiennych w czasie obciążeń cieplnych winna być spełniona równość liczb Fouriera ( $F_0$ ):

$$(2a) \quad (F_0)_m = \frac{a_m \cdot t_m}{l_m^2},$$

$$(2b) \quad (F_0)_p = \frac{a_p \cdot t_p}{l_p^2},$$

$$(2c) \quad (F_0)_m = (F_0)_p.$$

Odpowiednie związki podobieństwa dla przestrzennego stanu odkształceń i naprężeń termosprężystych [11] mają postać: dla odkształceń

$$(3) \quad \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m} = \frac{(1+\nu_p) \cdot (1-\nu_m) \cdot \alpha_p \cdot (\Delta T_w)_p}{(1-\nu_p) \cdot (1+\nu_m) \cdot \alpha_m \cdot (\Delta T_w)_m}$$

i dla naprężeń

$$(4) \quad \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{E_p(1-\nu_m) \cdot \alpha_p \cdot (\Delta T_w)_p}{E_m(1-\nu_p) \cdot \alpha_m \cdot (\Delta T_w)_m}.$$

### 3. Założenia badań tensometrycznych

Pomiary tensometryczne przeprowadzane na modelach z tworzyw sztucznych o niskiej przewodności cieplnej wymagają uwzględnienia niepożądanego faktu grzania się siatki rezystancyjnej i lokalnie materiału modelowego. W związku z tym po wstępnych badaniach tego zjawiska ograniczono prąd zasilający czujniki pomiarowe do 0,00125 mA ( $U = 0,3$  V). Ponadto zrealizowano automatyczne przełączanie punktów pomiarowych i rejestrację wyników pomiarów.

W badaniach odkształceń termosprężystych metodą tensometryczną istotnym jest problem zapewnienia kompensacji cieplnej dla czujników elektrorezystancyjnych pomiarowych. W pracy zastosowano metodę badań odkształceń, którą realizowano w dwóch etapach. W pierwszym etapie rejestrowano odkształcenie całkowite  $\varepsilon_c$  w danym miejscu powierzchni modelu. Odkształcenie to w dowolnym kierunku  $x$  można określić wzorem:

$$(5) \quad (\varepsilon_c)_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha_m \cdot \Delta T_w + \left(\frac{\beta}{k} - \alpha_{cz}\right) \Delta T_w.$$

We wzorze (5) pierwsze dwa człony stanowią algebraiczną sumę odkształcenia wywołanego naprężeniami termosprężystymi  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  oraz odkształcenia wynikającego z rozszerzalności cieplnej materiału modelu. Ostatni człon wzoru (5) wyraża wpływ zmiany z temperaturą współczynnika rezystancji siatki przewodzącej czujnika oraz jej rozszerzalności cieplnej liniowej.

W drugim etapie określono odkształcenia pozorne  $\varepsilon'$  dla czujników, w próbie, w której realizowano równomierne ochładzanie (ogrzenie) modelu z czujnikami tensometrycznymi:

$$(6) \quad \varepsilon' = \left(\frac{\beta}{k} + \alpha_m - \alpha_{cz}\right) \cdot \Delta T_w.$$

Łatwo stwierdzić, że różnica odkształcenia całkowitego i odkształcenia pozornego dla danego czujnika pomiarowego daje poszukiwane odkształcenie termosprężyste:

$$(7) \quad \varepsilon_x = (\varepsilon_c)_x - \varepsilon'_x$$

lub wyrażone w naprężeniach w układzie współrzędnych  $x, y, z$ :

$$(8) \quad \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)].$$

#### 4. Materiał modelowy

W badaniach zastosowano materiał modelowy oparty na żywicy epoksydowej Epidian 5 (E-5) utwardzanej na zimno trójetylenoczeroaminą (Z-1) i plastyfikowanej ftalanem dwubutyłowym (FDB). Skład wagowy kompozycji był następujący:

E-5	100 cz.w.
FDB	20 cz.w.
Z-1	10 cz.w.

Kompozycja ta umożliwiła uzyskanie modeli przestrzennych o stosunkowo dużych rozmiarach. Założono badanie odkształceń termosprężystych na modelach w zakresie temperatur obniżonych od  $+20^\circ\text{C}$  do  $-25^\circ\text{C}$ . Wybór takiego zakresu temperatur miał na celu zmniejszenie podatności na pełzanie mechaniczne materiału modelowego.

Przeprowadzono badania charakterystyk mechanicznych  $E$  i  $\nu$  oraz współczynnika rozszerzalności cieplnej  $\alpha$  i współczynnika wyrównywania temperatury  $a$ . Stwierdzone dla modułu sprężystości podłużnej i współczynnika rozszerzalności cieplnej zależności od temperatury można wyrazić w postaci liniowej:

$$(9) \quad E = 3500 - 21,6 T \quad [\text{MN/m}^2],$$

$$(10) \quad \alpha = 0,000080 + 0,0000005 T \quad [\text{deg}^{-1}],$$

gdzie:  $T$  w  $^\circ\text{C}$

W rozpatrywanym przypadku materiału modelowego i przedziału temperatur określono współczynnik Poissona  $\nu$  oraz współczynnik wyrównywania temperatury  $a$ , uzyskując wartości

$$\nu = 0,39,$$

$$a = 0,00088 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

#### 5. Odkształcenia pozorne

Zależność (6) na odkształcenia pozorne można wyrazić w postaci:

$$(11a) \quad \varepsilon' = \gamma \cdot \Delta T_w$$

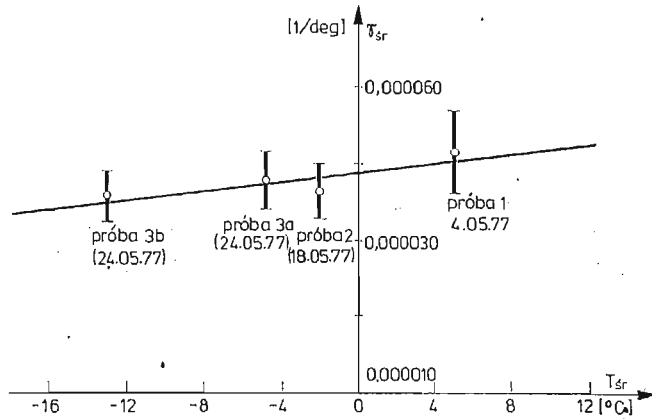
gdzie

$$(11b) \quad \gamma = \frac{\beta}{k} + \alpha_m - \alpha_{cz}$$

Wartość współczynnika odkształceń pozornych  $\gamma$  może być określona w badaniach wzorcowych, na próbkach z materiału modelu bądź bezpośrednio dla czujników tensometrycznych naklejonych na modelu. W pracy zastosowano określenie współczynnika odkształceń pozornych dla czujników naklejonych na badanym modelu.

W badaniach wybranego modelu, połączenia płaszcz walczaka z króćcem, na którym naklejono 48 czujników tensometrycznych RL5/120, w kilku próbach określono odkształcenie pozorne dla wszystkich czujników pomiarowych. Stwierdzono w badaniach rozrzut wartości współczynnika odkształceń pozornych dla poszczególnych czujników oraz zależność współczynnika odkształceń pozornych od temperatury (rys. 1). Zmienność współczynnika odkształceń pozornych od temperatury przybliżono zależnością liniową:

$$(12) \quad \gamma_i = (\gamma_0)_i + a_1 \cdot T \text{ [deg}^{-1}\text{]}$$



Rys. 1. Zależność współczynnika odkształceń pozornych od temperatury  $\gamma_{sr} = \gamma_{sr}(T_{sr})$  dla czujników naklejonych na modelu połączenia walczaka z króćcem



Rys. 2. Widok modelu walczaka z naklejonymi tensometrami i termoelementami

gdzie:  $T$  — temperatura w  $^{\circ}\text{C}$ ,

$i$  — wskaźnik oznaczający pojedynczy czujnik tensometryczny.

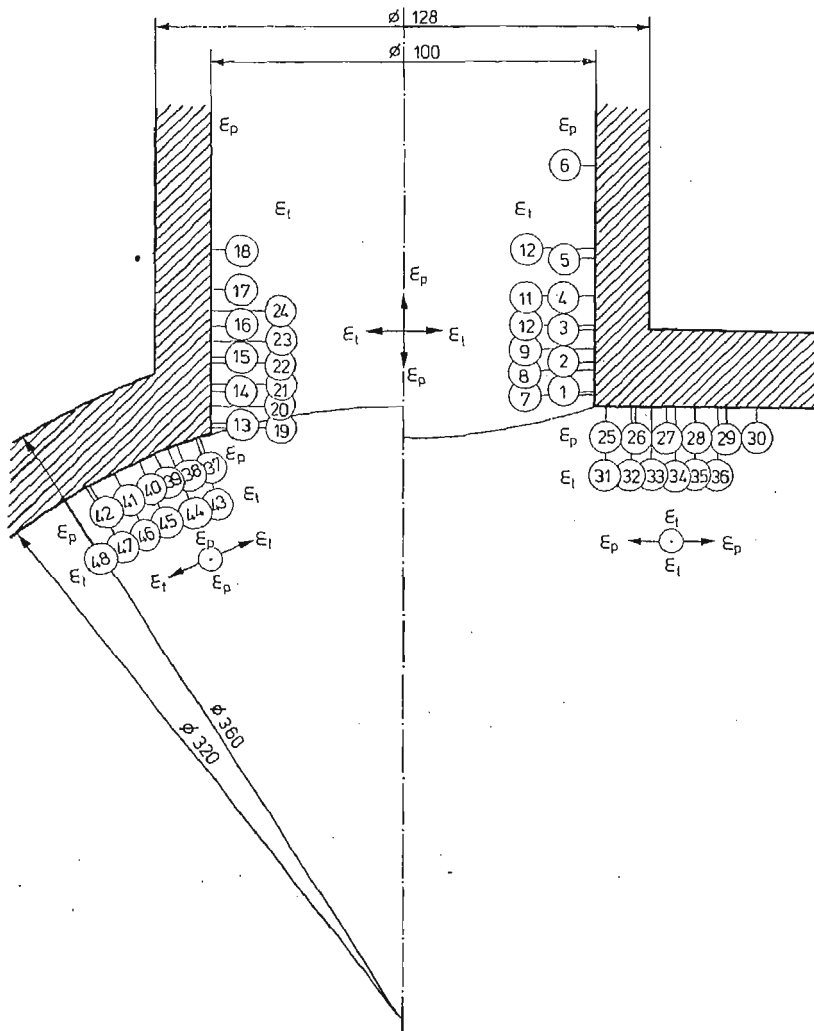
Dla badanego modelu i zbioru czujników uzyskano:

$(\gamma_0)_{sr} = 0,000039$  [ $\text{deg}^{-1}$ ] w temperaturze  $0^{\circ}\text{C}$ ,

a  $a_1 = 0,000000296$  [ $\text{deg}^{-2}$ ].

#### 6. Badanie odkształceń termosprężystych w modelu połączenia rury grubościennej z płaszczem walczaka

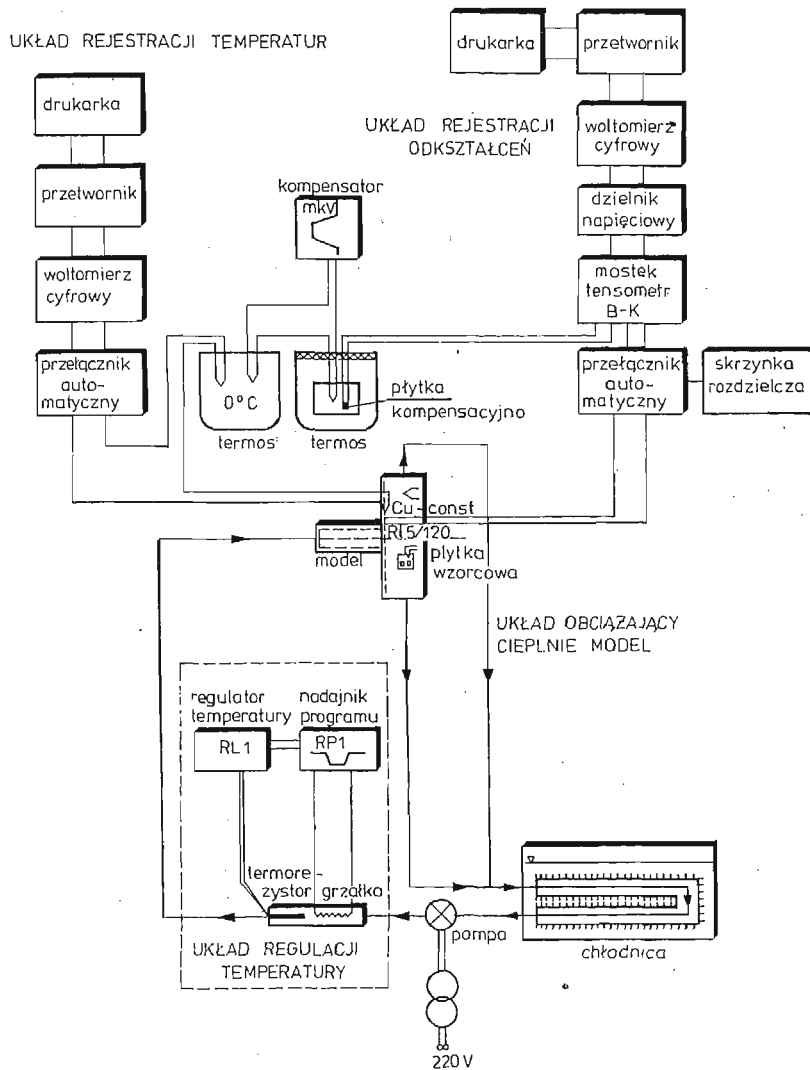
Na modelu połączenia płaszcza walczaka  $\text{Ø}360/\text{Ø}320/380$  z króćcem  $\text{Ø}128/\text{Ø}100/130$  naklejono 48 tensometrów RL 5/120 po stronie wewnętrznej w głównych płaszczyznach symetrii (rys. 2 i rys. 3). Ponadto naklejono miniaturowe termoelementy Cu-Konst



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia tensometrów w połączeniu walczaka z króćcem.

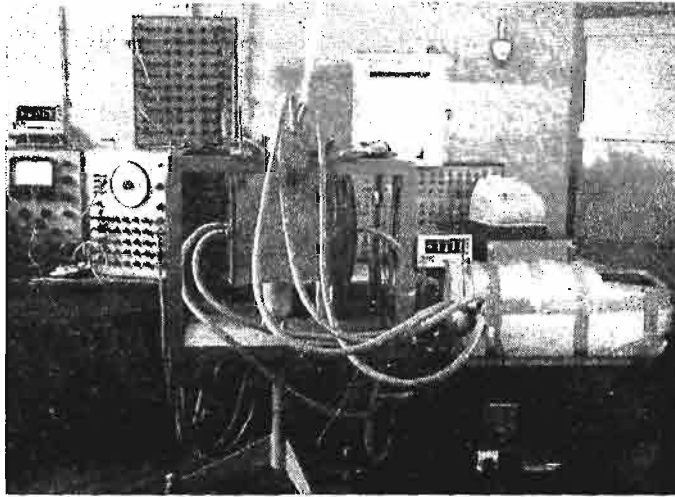
o grubości drucików 0,2 i 0,15 mm po stronie wewnętrznej i zewnętrznej modelu dla rejestracji pola temperatur w pobliżu tensometrów jak i ogólnego rozkładu temperatur.

Do rejestracji odkształceń wykorzystano zestaw tensometryczny Bruel i Kjaer (1516, 1542, 1543), dzielnik napięcia, woltomierz cyfrowy (V530, V533), przetwornik do drukarki (prod. NRD, 3511a) i drukarkę (prod. NRD, 3534b).

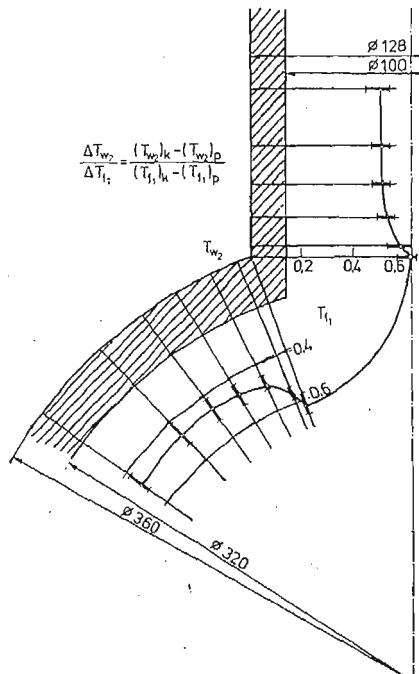


Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego

Dla określenia temperatur wykorzystano przełącznik automatyczny 50-punktowy (prod. NRD SG 151 typ 12001), woltomierz cyfrowy (V530, V533), przetwornik do drukarki (3511a) i drukarkę (3534b).



Rys. 5. Widok stanowiska badawczego



Rys. 6. Rozkład temperatur na ścianie zewnętrznej modelu w głównej płaszczyźnie obwodowej walczaka

Model obciążono cieplnie za pomocą alkoholu etylowego specjalnie ochładzanego o regulowanej prędkości zmian temperatury  $v_T = \Delta T_f / \Delta t$  ośrodka obciążającego cieplnie model. Schemat i widok stanowiska badawczego pokazano odpowiednio na rys. 4 i 5.

Badania modelu połączenia płaszczka walczaka z króćcem przeprowadzono przy dwóch prędkościach  $V_{T1}$  i  $V_{T11}$  zmian temperatury ośrodka i  $V_{T1} = \Delta T_f / \Delta t = -0,030$  [deg · s<sup>-1</sup>] i  $V_{T11} = -0,050$  [deg · s<sup>-1</sup>].

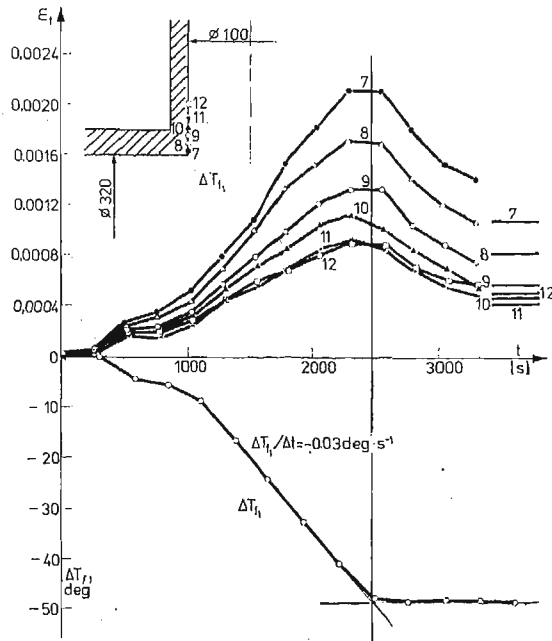


Rozkład temperatur na ściance modelu po stronie zewnętrznej w stanie stacjonarnym uzyskany z trzech prób badania odkształceń całkowitych w głównej płaszczyźnie symetrii modelu pokazano przykładowo na rys. 6.

W celu określenia odkształceń termosprężystych wyznaczono wpierw odkształcenia pozorne w stanie stacjonarnym i niestacjonarnym ( $V_T \neq 0$ ) przy zastosowaniu wprowadzonej zależności:

$$(13) \quad \varepsilon'_i = \left[ (\gamma_0)_i + a_1 \frac{T_{wp} + T_{wk}}{2} \right] \cdot \Delta T_w$$

gdzie:  $T_{wp}$  i  $T_{wk}$  początkowa i końcowa temperatura ścianki ( $T_{wk}$  dla chwili czasu  $t$ ). Przebieg poszukiwanych wartości odkształceń termosprężystych przy prędkości  $V_{T_1} = -0,030$  [deg · s<sup>-1</sup>] pokazano przykładowo na rys. 7.



Rys. 7. Przebieg w czasie odkształceń obwodowych  $\varepsilon_t$  w krótcu w głównej pł. podłużnej przy  $\Delta T_{T_1}/\Delta t = -0,030$  [deg · s<sup>-1</sup>]

Naprężenia termosprężyste  $\sigma_p$  i  $\sigma_t$  odpowiednio w kierunkach wzdłużnym i obwodowym, wyznaczone z badań tensometrycznych określono z zależności:

$$(14) \quad \sigma_p = \frac{1}{E_{w_1}} (\varepsilon_p + \nu \varepsilon_t),$$

$$\sigma_t = \frac{1}{E_{w_1}} (\varepsilon_t + \nu \varepsilon_p)$$

gdzie:  $E_{w_1}$  — moduł sprężystości podłużnej dla temperatury ścianki od strony ośrodka 1  
 $\varepsilon_p, \varepsilon_t$  — odkształcenia termosprężyste odpowiednio w kierunkach wzdłużnym i obwodowym.

Wartości naprężeń uzyskanych w badaniach tensometrycznych odniesiono umownie do naprężenia  $\sigma_{teoret}$  wyznaczonego dla wewnętrznej ścianki króćca ( $k$ ) przy stałych  $E$  i  $\alpha$  niezależnych od temperatury [1]:

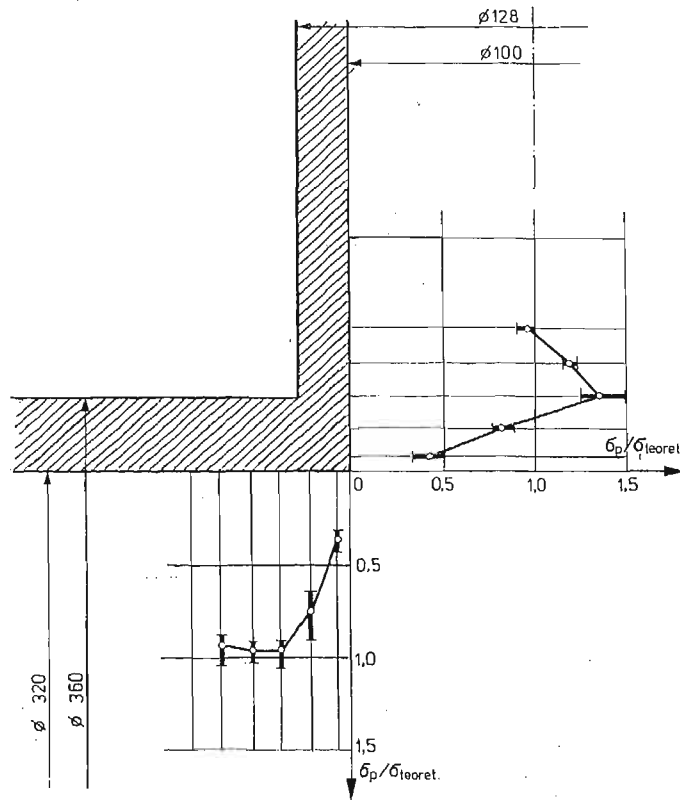
$$(15) \quad \sigma_{teoret} = \frac{E_{sr} \cdot \alpha_{sr} \cdot (\Delta T_w)_k}{2(1-\nu) \cdot \ln b/a} \left( 1 - \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \ln \frac{b}{a} \right)$$

gdzie:  $b$  i  $a$  zewnętrzny i wewnętrzny promień króćca,  $b/a = 1,28$ ,

$E_{sr}$ ,  $\alpha_{sr}$  — wielkości określone z wyrażeń (9) i (10) dla średniej arytmetycznej temperatury

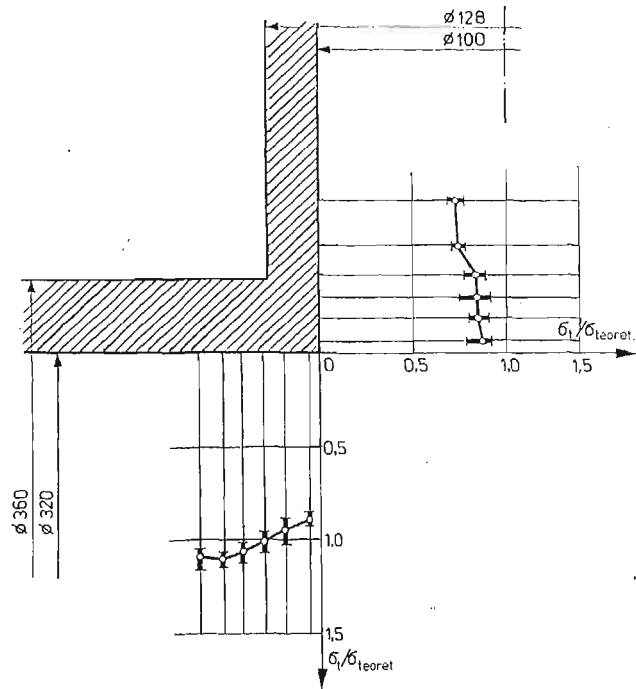
ścianki króćca  $T_{w_{sr}} = \frac{1}{2} (T_{w_1} + T_{w_2})$  w oddaleniu od połączenia z powłoką walcową,

$(\Delta T_w)_k$  — przyrost temperatury ścianki króćca w oddaleniu od połączenia z powłoką.

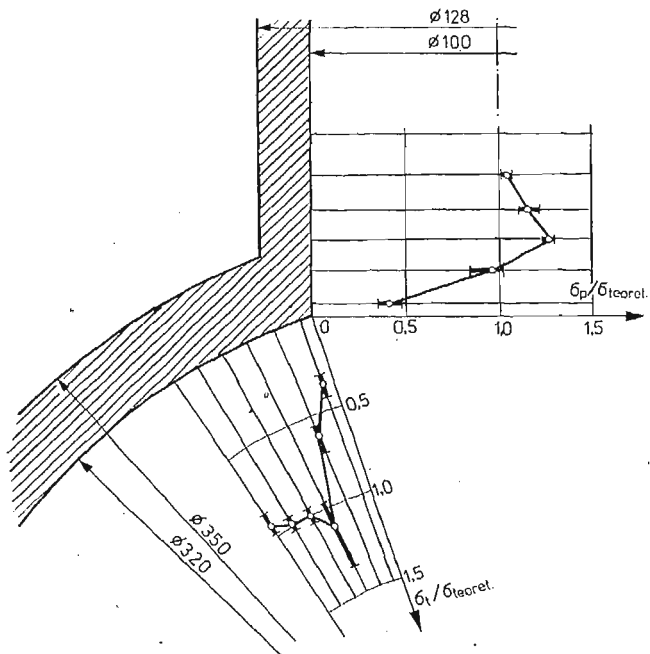


Rys. 8.  $\sigma_p/\sigma_{teoret}$  w głównej płaszczyźnie podłużnej w stanie stacjonarnym

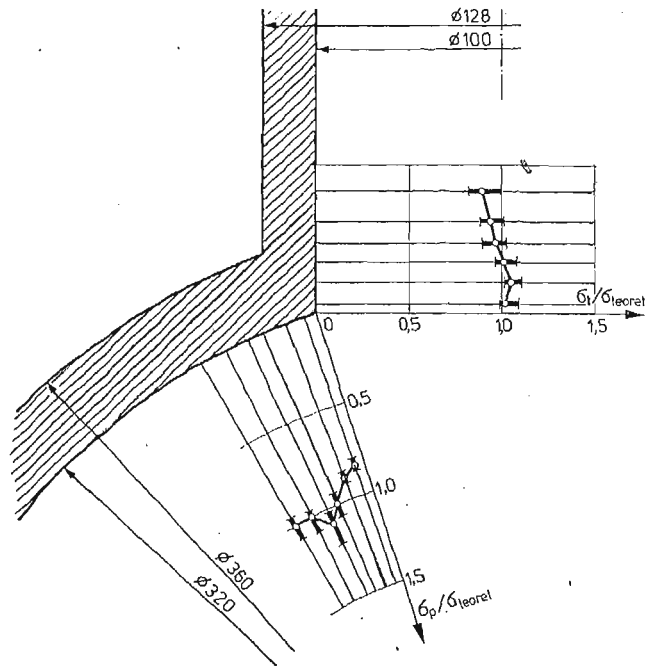
Na rys. 8÷11 przedstawiono rozkład stosunku  $\sigma/\sigma_{teoret}$  wyznaczonego na podstawie wyników trzech serii badań. Zwracają uwagę podobne rozkłady odpowiadających sobie naprężeń niezależnie od orientacji głównej płaszczyzny walczaka oraz niższe wartości naprężeń w oddaleniu od węzła króćcowego. Zagadnienie ostatnie rozpatrywano za pomocą metody elementów skończonych dla wycinka rury grubościenniej.



Rys. 9.  $\sigma_t/\sigma_{t,theoret.}$  w głównej płaszczyźnie podłużnej w stanie stacjonarnym



Rys. 10.  $\sigma_p/\sigma_{p,theoret.}$  w króćcu i  $\sigma_t/\sigma_{t,theoret.}$  w powłoce walcowej w głównej płaszczyźnie obwodowej w stanie stacjonarnym



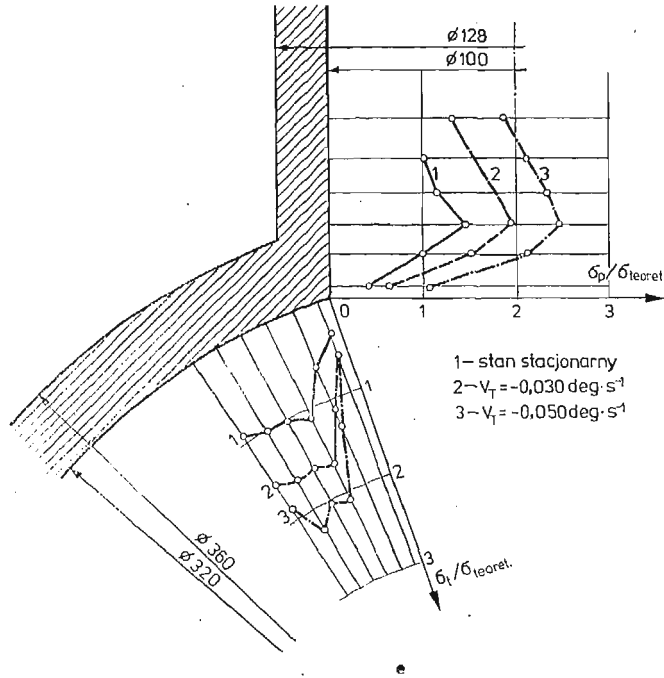
Rys. 11.  $\sigma_t/\sigma_{t,teoret.}$  w króćcu i  $\sigma_p/\sigma_{p,teoret.}$  w powłoce walcowej w głównej płaszczyźnie obwodowej w stanie stacjonarnym

Analiza rozkładu naprężeń w wycinku rury grubościenniej prowadzona za pomocą metody elementów skończonych przy zmienności  $E = E(T)$  i  $\alpha = \alpha(T)$  jak w eksperymencie wykazała niższe wartości naprężeń na brzegu wewnętrznym w stosunku do obliczeń przy przyjęciu  $E_{sr} = \text{const}$  i  $\alpha_{sr} = \text{const}$ . Przy  $b/a = 1,47$  uzyskano na brzegu wewnętrznym  $(\sigma_t)_{E(T), \alpha(T)}/\sigma_{t,teoret.} = 0,87$ . Mniejsze wartości naprężeń w powłoce walcowej (pw) wynikają z uzyskania przyrostu temperatury w powłoce  $(\Delta T_w)_{pw}$  względnie niższego od wartości oczekiwanej tzn. w przybliżeniu proporcjonalnej do grubości ścianek powłoki walcowej i króćca przy podobnych warunkach wymiany ciepła. Zagadnienie to jest ściśle związane z realizacją przepływów czynnika obciążającego cieplnie model i wynikających stąd warunków przejmowania ciepła między płynem i modelem.

#### 7. Analiza wyników badania naprężeń termosprężystych w stanie niestacjonarnym

Dla przebiegów odkształceń termosprężystych w stanie niestacjonarnym określono maksymalne wartości odkształceń odpowiadające chwili ustalenia się temperatury ośrodka obciążającego cieplnie model. Naprężenia obliczono ze związków (14). Stwierdzono zależność zmian wartości naprężeń przy wzroście prędkości zmian temperatury ośrodka obciążającego cieplnie model. Rozkłady naprężeń uzyskane w stanie stacjonarnym mają podobny charakter jak w stanie niestacjonarnym co przykładowo ilustruje rys. 12. War-

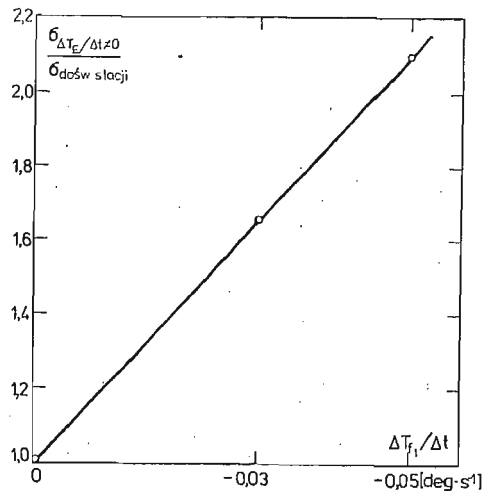
BADANIA ODKSZTAŁCEŃ



Rys. 12.  $\sigma_p/\sigma_{t,theoret.}$  w króćcu i  $\sigma_t/\sigma_{t,theoret.}$  w powłoce walcowej w głównej płaszczyźnie obwodowej w stanie stacjonarnym i niestacjonarnym

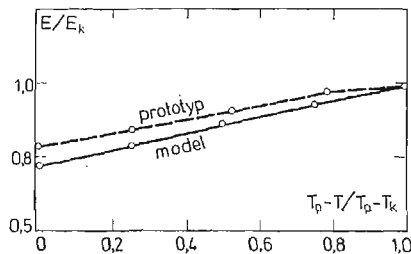
tości naprężeń  $\sigma_{v_T}$  w stanie niestacjonarnym ( $\Delta T_{f_1}/\Delta t \neq 0$ ) odniesiono w danych punktach pomiarowych do wartości uzyskanych w stanie stacjonarnym  $\sigma_{dośw. stacj.}$

(16) 
$$\sigma_{v_T}/\sigma_{dośw. stacj.}$$



Rys. 13.  $\sigma_{v_T}/\sigma_{dośw. stacj.} = f(v_T = \Delta T_{f_1}/\Delta t)$

Uśrednione wyniki wartości stosunków określonych z zależności (16) dla dwóch prędkości  $V_{T_I} = -0,030$  [deg · s<sup>-1</sup>], i  $V_{T_{II}} = -0,050$  [deg · s<sup>-1</sup>] pokazano na rys. 13. Z rysunku widać, że współczynnik wzrostu naprężeń w dowolnym punkcie jest proporcjonalny do zmian prędkości ośrodka obciążającego cieplnie model.



Rys. 14.  $E/E_k = f[(T_p - T)/(T_p - T_k)]$  w modelu i w prototypie

Przeniesienie wyników badań modelowych na prototyp jest możliwe przy wykorzystaniu równości liczb Fouriera ( $F_0$ ). Można wykazać, że prędkość zmian temperatury w prototypie wyrazi się zależnością

$$(17) \quad v_{T_p} = v_{T_m} \frac{t_m}{t_p}$$

co przy:

$$a_m = 0,00088 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$a_p = 0,10 \text{ cm}^2, \text{ s}^{-1}$$

$$i(t_m/l_p) = \frac{1}{5}$$

daje  $V_{T_p} = V_{T_m} \cdot 4,454$

Wobec stwierdzonych zmian modułu sprężystości podłużnej  $E = E(T)$  w funkcji temperatury, jak również znanych zmian modułu sprężystości podłużnej materiału prototypu, istotne jest określenie różnic charakteru zmian modułu  $E$  w funkcji temperatury dla modelu i prototypu. W tym celu stosunek  $E/E_k$  w funkcji  $(T_p - T)/(T_p - T_k)$  (gdzie  $T_p$  początkowy parametr,  $E_k$ ,  $T_k$  — końcowe parametry procesu cieplnego), dla prototypu i modelu. Na rys. 14 przedstawiono powyższe zależności, które wykazują duże podobieństwo zmian modułu sprężystości podłużnej w funkcji temperatury.

### 8. Wnioski

Przedstawiona metoda badań odkształceń i naprężeń termosprężystych pozwala na analizę odkształceń i naprężeń stacjonarnych i niestacjonarnych w modelach epoksydowych, w których łatwo jest zrealizować obciążenie cieplne podobne jak w prototypie.

Należy podkreślić zalety badań modelowych w stosunku do badań obiektów prototypowych gdyż można tu uzyskać wartości odkształceń o rząd wyższe niż w prototypie (por. wzór 3) oraz możliwość rozszerzenia skali czasu (por. wzory 2 i 17).

Metoda tensometryczna może być zastosowana do badania obszarów obiektów przestrzennych trudno dostępnych jak też do badań wewnątrz ścianek modeli.

## Literatura cytowana w tekście

1. S. TIMOSHENKO, J. N. GOODIER, *Teoria sprężystości*, Wyd. „Arkady”, W-wa, 1962.
2. W. NOWACKI, *Zagadnienia termosprężystości*, PWN, W-wa 1960.
3. A. JAWORSKI, K. RACZYŃSKI, *Analiza naprężeń i odkształceń termosprężystych w ciałach obrotowych wywołanych osiowo-symetrycznym polem temperatury przy użyciu metody elementów skończonych*, Archiwum Budowy Maszyn, tom XXIII 1976, z. 4, 529—548.
4. J. SZMELTER, St. DOBROCIŃSKI, M. WIECZÓREK, *Teoretyczna analiza naprężeń w połączeniach kroćcowych*, Sprawozdanie z etapu IV dla O.B.R.K. i U.E. w Tarnowskich Górach, WAT, W-wa, 1976.
5. Z., ORŁOŚ, Z., DYLAĞ, *Badanie metodą elastooptyczną stanów naprężenia wywołanych obciążeniami termicznymi*, Rozprawy Inżynierskie, 2, 11, 1963, 335—349.
6. Ch. P., BURGER, *Thermal modeling*, Experimental Mechanics 1975, 15 (11).
7. K. ANDERKO, D. KEILBACH, E. WACKER, *Wärmespannungsmessungen Dieselmotor mit Hilfe von Dehnmessstreifen*, MTZ, 28 (1967), 93—100.
8. B. LAWTON, *Use of plastic models to evaluate thermal strains in diesel — engine pistons*, Journal of Strain Analysis, 1968, 8 (3), 176—186.
9. A. J. BUSH, *Considerations and solutions in evaluating thermal stresses in a composite cylinder*, Experimental Mechanics, 1971, 11 (2), 87—93.
10. O. B. EPELLE, M. L. MEYER, *Measurement of thermal strains by strain gauges embedded in epoxy models*, Proc. 4-th Int. Confer. Exper. Stress Analysis, Cambridge, 1971.
11. J. D. HOVANESIAN, H. C. KOWALSKI, *Similarity in thermoelasticity*, Experimental Mechanics, 1967, 7 (2), 82—84.

## Резюме

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ  
ЭПОКСИДНЫХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНОЙ  
ТЕНЗОМЕТРИИ

В работе представлены исследования термоупругих деформаций моделей из эпоксидной смолы. С помощью проволочных датчиков сопротивления были ведены исследования для двух отдельных рядов измерений деформаций. В первом этапе определено суммарное термоупругих и кажущихся деформаций, во втором — только кажущиеся. Разность между ними является искаемыми термоупругими деформациями. Представлено анализ тепловой нагрузки модели и некоторые результаты исследований деформаций и напряжений для двух скоростей перемен температуры тепловой нагрузки.

## Summary

INVESTIGATIONS OF THERMOELASTIC STRAINS AND STRESSES OF EPOXY MODELS BY  
MEANS OF STRAIN GAUGES

Paper presents investigations of thermal strains measured by strain gauges cemented to the surface of epoxy models. The investigations were performed in two stages. At the first one the sum of thermal and apparent strains was measured, at the second one, the apparent strains were determined. The difference of the above mentioned strains yields the required thermal strains. The analysis of thermal loads of the model as well as the corresponding thermal strains and stresses in the stationary and transient state, was presented for two speeds of temperature changes of the thermal loading.

WAT

Praca została złożona w Redakcji dnia 5 lutego 1978 r.

Praca uzyskała III nagrodę w ogólnopolskim konkursie na pracę doświadczalną w mechanice organizowanym w 1977 r. przez Oddział Częstochowski PTMTiS