

54/80

**J. Wicher, W. Oliferuk, I. Sitarek  
P. Tirinda, R. Chmurny**

**WPLYW SAMOISTNEGO NAGRZEWANIA SIĘ  
MATERIAŁU WIBROIZOLACYJNEGO  
NA JEGO WŁASNOŚCI DYNAMICZNE  
W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ  
SINUSOIDALNIE ZMIENNYCH**



P. 269

**WARSZAWA 1980**

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 7 listopada 1980 r.

Zarejestrowana pod nr 54/1980



57107



Na prawach rękopisu

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 170 egz. Ark.wyd.0,9. Ark. druk. 1,5.

Oddano do drukarni w grudniu 1980 r.

Nr zamówienia 802/o/80

---

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,  
ul.Śniadeckich 8

Jerzy Wiehor, Wiera Oliferuk, Ireneusz Sitarek

Zakład Układów Mechanicznych

Peter Tirinda, Rudolf Chmúrny

Ústav Mechaniky Strojov SAV

WPLYW SAMOISTNEGO NAGRZEWANIA SIĘ MATERIAŁU  
WIBROIZOLACYJNEGO NA JEGO WŁASNOŚCI DYNAMICZNE  
W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ SINUSOIDALNIE ZMIENNYCH

1. Wstęp.

Podczas projektowania elementów wibroizolacyjnych należy brać pod uwagę, oprócz wymuszeń dynamicznych obiektu, również wpływ szeregu innych parametrów jak: czas pracy, warunki zewnętrzne i zjawiska zachodzące w samym materiale. Warunki wewnętrzne i czas wywierają, szczególnie duży wpływ na własności elementów wibroizolacyjnych wykonanych z materiałów elastomerowych, a zwłaszcza gumowych lub gumopodobnych. Obserwuje się na przykład, że w miarę upływu czasu rośnie twardość materiału. Zjawisko to, w przypadku gumy można wytłumaczyć małą szybkością wulkanizacji sprawiającą, że proces wulkanizacji w szcążkowej formie zachodzi jeszcze podczas eksploatacji. Wzrost twardości z tego powodu może osiągać wartość 5-10 stopni w skali Shore'a, co istotnie wpływa na zmianę parametrów dynamicznych wibroizolatora. Na zmianę twardości mają także wpływ inne zjawiska, takie jak, zachodzące w niektórych elastomerach, zjawisko sieciowania /cross - linking/.

Własności dynamiczne materiałów elastomerowych, w warunkach wymuszeń o charakterze harmonicznym można opisać za pomocą zespolonych modułów sprężystości.

Zjawisko prostego ścinania opisuje moduł odkształcenia postaciowego

$$G_{\omega, \theta}^* = G_{\omega, \theta} (1 + j \delta_{\omega, \theta}) ,$$

- gdzie  $G_{\omega, \theta}^*$  - zespolony moduł odkształcenia postaciowego zależny od częstotliwości kołowej  $\omega$  i temperatury  $\theta$ .
- $G_{\omega, \theta}$  - część rzeczywista modułu zwana modułem akumulacji lub dynamicznym modułem sprężystości, opisująca własności sprężyste /sztywność/ elastomeru. Jej wartość proporcjonalna jest do energii magazynowanej podczas odkształcenia.
- $\delta_{\omega, \theta}$  - współczynnik strat lub współczynnik tłumienia będący względną miarą tłumienia. Jest on proporcjonalny do energii rozproszonej podczas odkształcenia. Wartość współczynnika tłumienia jest równa tangensowi kąta o jaki odkształcenie jest opóźnione w fazie w stosunku do naprężenia. Współczynnik tłumienia  $\delta_{\omega, \theta}$  można wyrazić poprzez logarytmiczny dekrement tłumienia  $\eta$  ;

$$\delta_{\omega, \theta} = \frac{1}{\pi} \eta .$$

Niektóre przypadki obciążenia wygodnie jest opisywać za pomocą modułu sprężystości  $E$  /dla gumy  $E = 3G$ /. Należy do nich ściśnięcie elementu gumowego zamocowanego między dwiema sztywnymi płytami /typ obciążenia, dla którego wyniki doświadczalne przedstawimy niżej/. Własności sprężyste materiału w tym przypadku można opisać modułem:

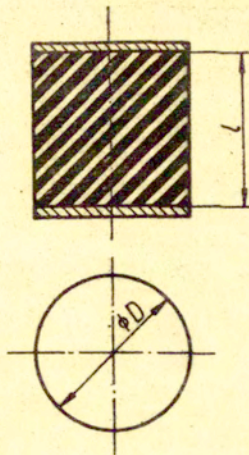
$$E_a = \frac{E(1 + \beta S^2)}{1 + \frac{E}{B}(1 + \beta S^2)} \quad \text{lub} \quad E_a \approx E(1 + \beta S^2) .$$

gdzie:  $B$  - moduł ściśliwości

$S$  - współczynnik kształtu. Dla próbki o wymiarach cylindrycznych /rys.1/:

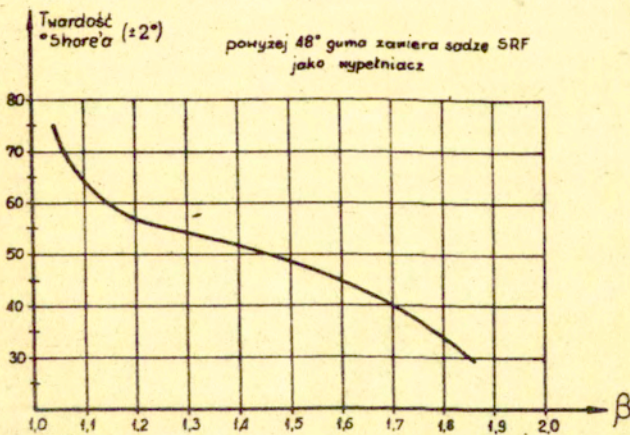
$$S = \frac{D}{4t}$$

$\beta$  - stała liczbowa zależna, między innymi od twardości materiału. Zależność tę przedstawiono na rys.2.



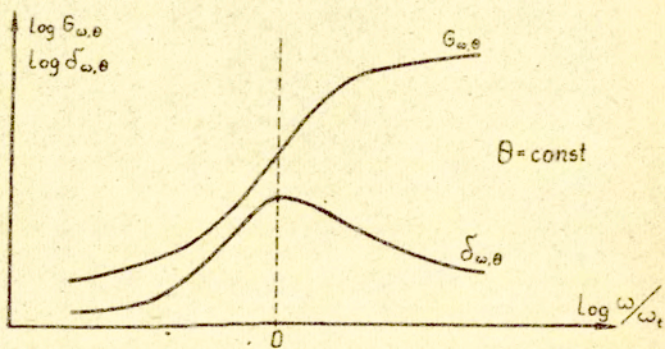
Rys. 1.

Czynnikami zewnętrznymi wywierającymi istotny wpływ na własności dynamiczne materiału są między innymi częstotliwość obciążenia i temperatura. Wykazano doświadczalnie, że wartości modułów dynamicznych rosną, gdy rośnie częstotliwość obciążenia.

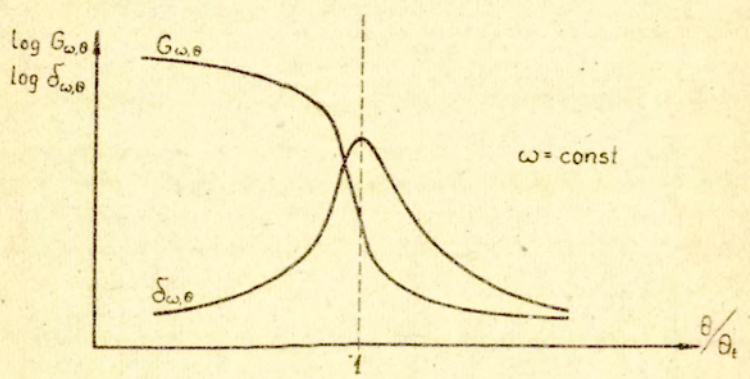


Rys. 2.

$\omega$  lub gdy maleje temperatura  $\theta$ . Zależności te przedstawiono na rys.3 i 4.



Rys.3.



Rys.4.

Częstotliwość przemiany  $\omega_t$  i temperatura przemiany  $\theta_t$  odnosi się do przemiany materiału gumowego w stan szklisty, w którym

moduł  $G_{\omega, \theta}$  staje się tak duży, że charakterystyczna sprężystość materiału przestaje być dostrzegalna. Przemiana ta zachodzi w dostatecznie niskich temperaturach lub przy wystarczająco wysokich częstotliwościach obciążenia. Współczynnik tłumienia  $\delta_{\omega, \theta}$  w czasie przemiany gumy ze stanu lepkosprężystego w stan szklisty osiąga swą największą wartość; odpowiada to temu zakresowi temperatury i częstotliwości w którym wartość modułu  $G_{\omega, \theta}$  wzrasta w sposób najbardziej gwałtowny.

Trzeba pamiętać, że w przypadku materiałów gumowych i gumopodobnych obowiązuje zasada równoważności temperaturowo-częstotliwościowej, według której wzrost częstotliwości zmian odkształcenia jest równoważny zmniejszeniu temperatury materiału. A więc przemianę materiału gumowego ze stanu kauczukopodobnego w lepkosprężysty lub z lepkosprężystego w stan szklisty można osiągnąć zmniejszając temperaturę przy stałej częstotliwości lub zwiększając częstotliwość zmian odkształcenia przy stałej temperaturze.

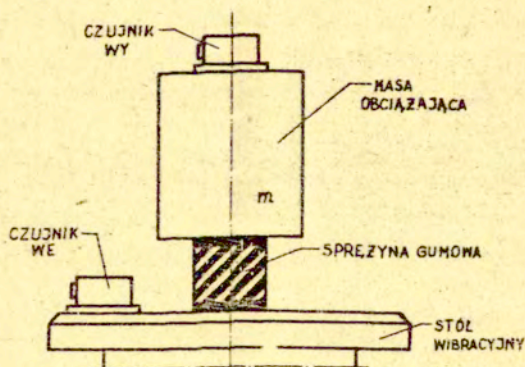
W warunkach eksploatacyjnych materiał pracuje w zakresie stanu kauczukopodobnego lub lepkosprężystego i w każdym punkcie zakresu ma inne własności dynamiczne. Istotną więc sprawą jest nie tylko informacja jak daleko zakres pracy materiału wibroizolatora jest odległy od przemiany w stan szklisty ale również w jakim stopniu ulegają zmianie warunki zewnętrzne w czasie pracy tzn. jak bardzo zmienia się częstotliwość drgań i temperatura materiału wibroizolacyjnego. Warunki te mogą ulegać bardzo dużym wahaniom z dwóch przyczyn: w wyniku zmiany temperatury otoczenia lub w efekcie samoistnego nagrzewania się pracującego elementu wibroizolacyjnego. Wpływ zmian temperatury na własności dynamiczne gumy zależy od jej składu chemicznego oraz od częstotliwości obciążenia. I tak na przykład dla kauczuku zmiana temperatury od  $5^{\circ}\text{C}$  do  $35^{\circ}\text{C}$  w zakresie częstotliwości do 20 Hz nie wywiera istotnego wpływu na współczynnik tłumienia  $\delta_{\omega, \theta}$ . Jego wartość wynosi 0,025. Przy częstotliwości 500 Hz w temperaturze  $35^{\circ}\text{C}$   $\delta_{\omega, \theta} = 0,025$ , zaś w temperaturze  $5^{\circ}\text{C}$   $\delta_{\omega, \theta} = 0,1$ , a więc wzrasta czterokrotnie. Dla gumy zawierającej wypełniacz w postaci sadzy piecowej w ilości 50 % wagowo różnica ta jest mniejsza; dla analogicznych częstotliwości przy zmianie temperatury od  $35^{\circ}\text{C}$  do  $5^{\circ}\text{C}$   $\delta_{\omega, \theta}$  zmienia się

od 0,1 do 0,2 [3].

W literaturze można znaleźć wyniki badań wpływu temperatury otoczenia na własności dynamiczne gumy. Warto jednak zwrócić uwagę, że w warunkach eksploatacyjnych może nastąpić wzrost temperatury w wyniku samodzielnego nagrzewania się pracującego elementu gumowego. Zostało to potwierdzone doświadczalnie. W pewnych zaś, specyficznych warunkach pracy /warunki rezonansu/ wzrost temperatury materiału wibroizolacyjnego będący wynikiem tarcia wewnętrznego może osiągać wartość kilkudziesięciu °C, a więc może znacznie przekroczyć zakres zmian temperatury tego materiału wywołany wahaniami temperatury otoczenia. Konsekwencją tego może być fakt, że zmiana temperatury w wyniku samodzielnego nagrzewania się elementu gumowego będzie miała istotny wpływ na zmianę jego własności dynamicznych.

Przedstawione niżej wyniki badań elementu gumowego potwierdzają występowanie zmian tłumienia i sprężystości tego elementu w zależności od zmian temperatury, wywołanych samodzielnym nagrzewaniem się w warunkach obciążeń dynamicznych.

Celem niniejszej pracy jest badanie zmian rozkładu temperatury w gumowej sprężynie poddanej działaniu obciążeń dynamicznych w układzie przedstawionym na rys.5, oraz analiza zmienności parametrów charakteryzujących dynamiczne własności sprężyny: logarytmicznego dekrementu tłumienia i sztywności.



Rys. 5.

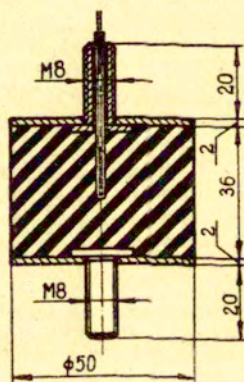


Pomiary przeprowadzono w takim układzie mechanicznym, w którym  $m = \text{const}$ , a więc o zmianach sztywności można było wnioskować na podstawie zmian częstości drgań własnych. Badano wpływ temperatury i liczby cykli obciążenia sinusoidalnie zmiennego na wartości tych parametrów. W wybranych chwilach procesu obciążenia mierzono rozkład temperatury na powierzchni bocznej sprężyny. W niektórych egzemplarzach mierzono jednocześnie temperaturę w środku sprężyny. Miało to na celu uzyskanie informacji o rozkładzie temperatury wewnątrz sprężyny. Rozkład taki pozwala na zlokalizowanie najsilniej grzejącego się obszaru sprężyny.

## 2. Metoda i warunki pomiarów.

Do badań użyto sprężyny gumowej o przekroju kołowym /rys.6/.

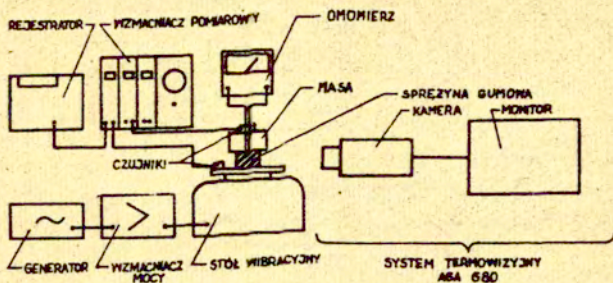
Umieszczono ją na stole wibracyjnym i obciążono masą  $m = 1,105 \text{ kg}$  /rys.5/.



Rys.6.

Układ pomiarowy zestawiono według schematu przedstawionego na rys.7. Elektromagnetyczny stół wibracyjny pobudzano poprzez wzmacniacz mocy sygnałem sinusoidalnie zmiennym z generatora o skokowej zmianie częstotliwości. Do pomiaru drgań użyto piezoelektrycznych czujników przyspieszeń i wzmacniacza - miliwoltomierza. Rozkład temperatury na powierzchni sprężyny gumowej wyznaczone metodą bezstykową, opartą na detekcji promieniowania podczerwonego.

Każde ciało o temperaturze wyższej niż 0°K emituje promieniowanie podczerwone. Całkowita moc  $M_{cc}$  tego promieniowania



Rys.7.

emitowana do półprzestrzeni przez jednostkę powierzchni ciała jest jednoznaczna funkcją jego temperatury  $T$  i wynosi

$$M_{cc} = \sigma T^4$$

gdzie  $\sigma$  - stała Stefana - Boltzmanna =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . Pomiar mocy można więc wykorzystać do bezstykowego wyznaczania temperatury. Promieniowanie emitowane przez badany obiekt pada na detektor. Sygnał elektryczny na wyjściu detektora jest miarą mocy tego promieniowania, a więc i miarą temperatury obiektu.

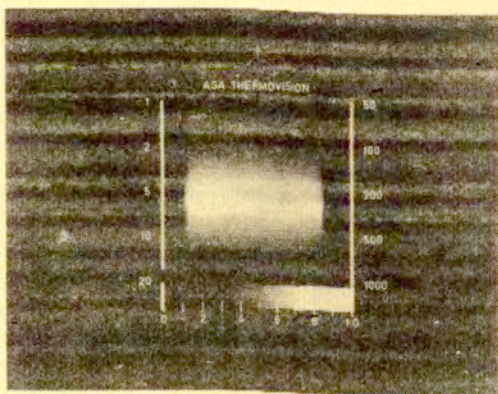
W niniejszej pracy stosowano system termowizyjny AGA-680. Zawiera on kamerę pozwalającą zbierać promieniowanie z kolejnych obszarów badanej powierzchni. Promieniowanie to jest skupione na powierzchni detektora. Sygnał z detektora jest wykorzystany do modulacji strumienia elektronów w lampie obrazowej. Daje to na ekranie lampy obraz termiczny badanej powierzchni. Obszary emitujące silniej są zobrazowane jako jaśniejsze, emitujące słabiej - jako ciemniejsze. Zdjęcie termowizyjne badanej sprężyny gumowej przedstawione jest na rys.8. Przy pomiarach ilościowych otrzymujemy na ekranie kontury izotermiczne w postaci wydzielonych obszarów o jednakowym stopniu szarości,

odpowiadających obszarom badanej powierzchni o jednakowej mocy promieniowania. Jeśli powierzchnia jest jednorodna, to są to obszary o jednakowej temperaturze. Każdy poziom temperatury może być zarejestrowany w innym kolorze. Najmniejsza różnica temperatur, jaką system termowizyjny jest w stanie wykryć - przy temperaturze badanego obiektu ok.  $30^{\circ}\text{C}$  - wynosi  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Im wyższa temperatura obiektu tym rozdzielczość temperaturowa systemu termowizyjnego jest lepsza.

Temperaturę w środku sprężyny wyznaczono za pomocą miniaturowego termistora umieszczonego w wydrążonym wzdłuż sprężyny otworze /rys.6/. Termistor ten pozwalał wyznaczać temperaturę w zakresie  $20 - 90^{\circ}\text{C}$ . W tym przypadku rozdzielczość temperaturowa wraz ze wzrostem temperatury malała. Dla temperatury  $30^{\circ}\text{C}$  wynosiła ona  $\sim 2^{\circ}\text{C}$ . Przed umieszczeniem w sprężynie termistor wykalowano zanurzając go w termostacie.

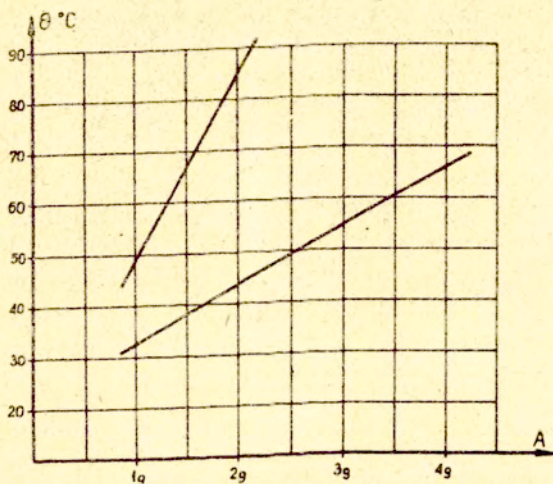
### 3. Badanie wzrostu temperatury elementu gumowego sprężyny poddanej działaniu obciążeń dynamicznych.

Zbadano narastanie temperatury sprężyny przy różnych wartościach obciążenia dynamicznego. Jest zrozumiałe, że temperatura rośnie ze wzrostem siły wymuszającej. Na rys.9a przedstawiono zależność wartości maksymalnej temperatury na powierzchni ele-



Rys.3.

mentu gumowego od amplitudy siły wymuszającej dla dwóch wybranych sprężyn.

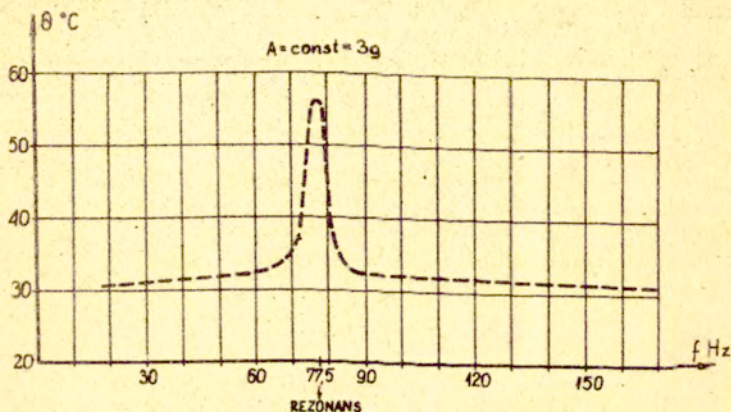


Rys.9a

Na osi pionowej oznaczono temperaturę najgorętszego obszaru na powierzchni elementu gumowego po ustaleniu się równowagi termicznej, na osi poziomej zaś - wartość siły wymuszającej odniesionej do jednostkowej masy, przedstawionej w postaci wielokrotności przyspieszenia ziemskiego  $g$  mierzonej czujnikiem na wejściu układu /czujnik WE/. Przy stałej masie obciążającej sprężynę gumową /rys.5/ wartość przyspieszenia jest proporcjonalna do amplitudy siły wymuszającej.

Zobserwowano znaczny wzrost temperatury elementu gumowego przy wymuszeniu, którego częstość pokrywa się z częstością rezonansową układu mechanicznego /sprężyna gumowa + masa obciążająca/. Dla innych częstości, nawet przy długotrwałym obciążeniu i dużej amplitudzie, wzrost temperatury jest znikomy i nie przekracza  $2^{\circ}\text{C}$  /rys.9b/. Fakt ten ma istotne znaczenie przy analizie wpływu szerokopasmowych obciążeń losowych. Jak wiadomo, obciążenia takie najczęściej występują w warunkach eksploatacyjnych urządzeń mechanicznych. W tym przypadku największy

wpływ na zmianę temperatury elementu gumowego mają jedynie składowe o częstościach równych częstościom rezonansowym odpowiednich elementów.



Rys. 9b.

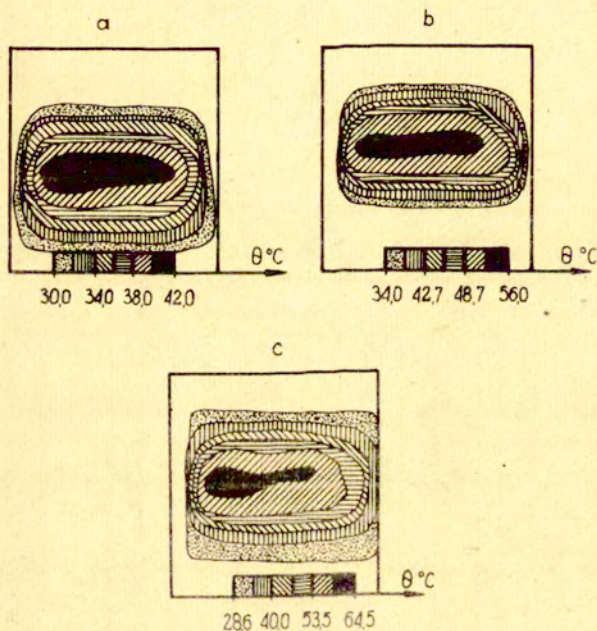
Z rozkładu temperatury na powierzchni elementu gumowego wynika, że najsilniej grzeją się obszary leżące w pobliżu płaszczyzny poziomej przechodzącej przez środek sprężyny  $\kappa$ /

Wyniki jednoczesnych pomiarów: rozkładu temperatury na powierzchni i wartości temperatury w jego środku pozwalają przypuszczać, że najwięcej ciepła wydziela się w środku elementu gumowego. Na rys. 11 przedstawiono narastanie temperatury w środku elementu gumowego, mierzonej za pomocą termistora i narastanie temperatury na powierzchni tego elementu mierzonej za pomocą systemu termowizyjnego. Wartości temperatury na powierzchni i w środku sprężyny były mierzone jednocześnie w wybranych chwilach tego samego cyklu obciążenia.

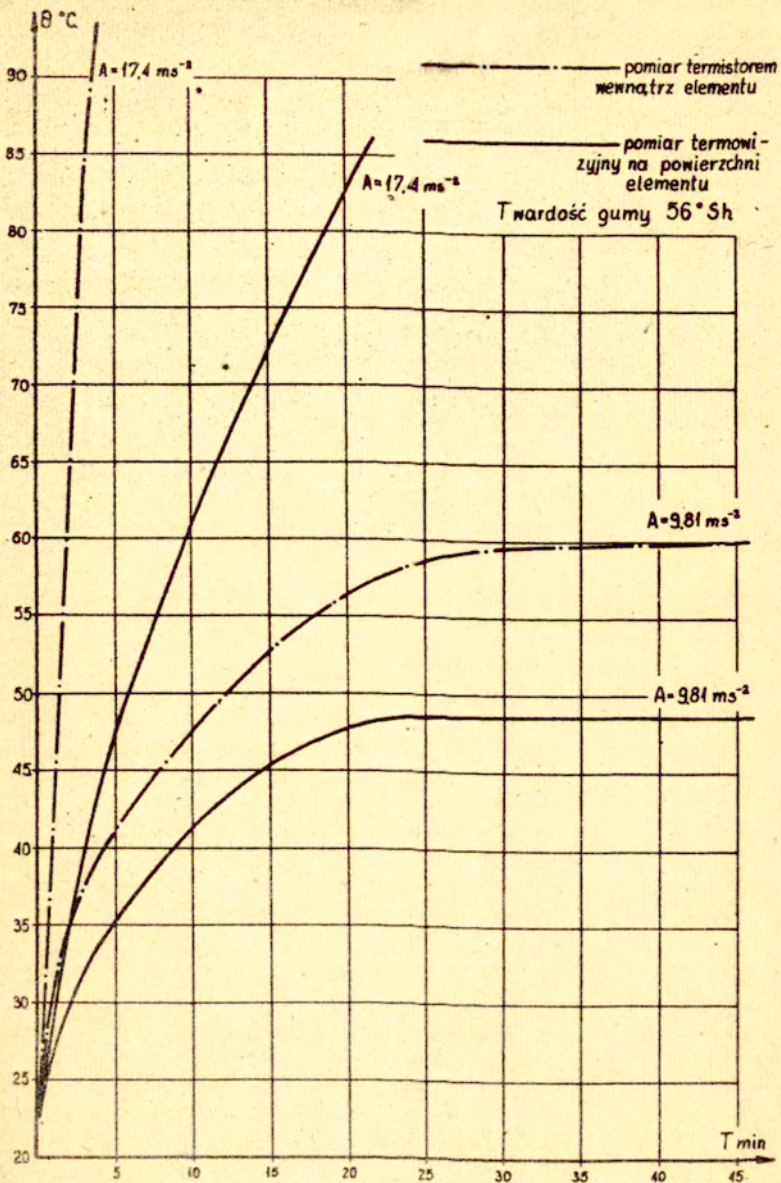
Stwierdzono ponadto, że ta sama sprężyna wzięta ponownie do badania po upływie jednego roku i poddana obciążeniom dynamicznym o parametrach takich jak poprzednio nagrzewała się do

$\kappa$ / Termogramy "gorącego" elementu gumowego sprężyny obciążonej dynamicznie w warunkach rezonansu przedstawia rys. 10. Wielkość amplitudy siły wymuszającej: 10a/2g, 10b/3g, 10c/4g.

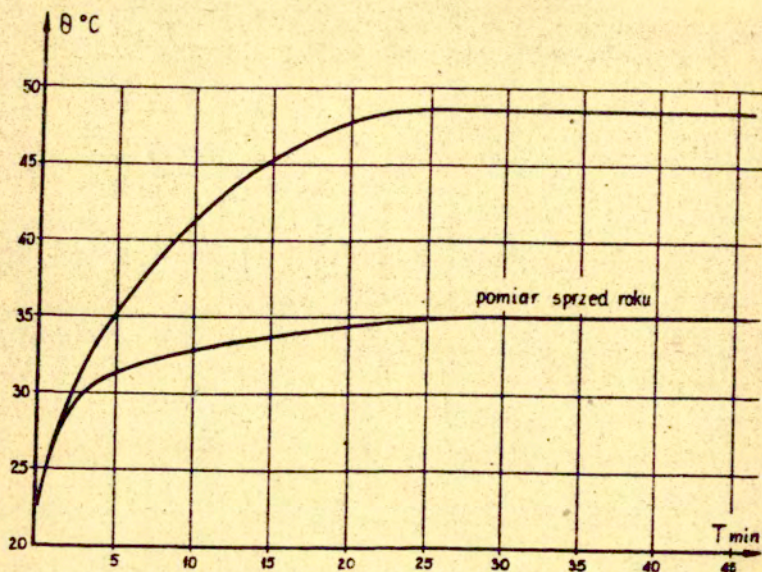
temperatury znacznie wyższej. Na rys.12 porównano narastanie temperatury na powierzchni sprężyny w czasie obciążania dynamicznego o amplitudzie  $1g$  z narastaniem temperatury obserwowanym w tych samych warunkach obciążenia po upływie jednego roku. Przypuszcza się, że zaobserwowana różnica w termicznym zachowaniu się sprężyny jest wynikiem procesu starzenia się gumy.



Rys.10.



Rys. 11.



Rys. 12.

4. Analiza zmienności parametrów charakteryzujących własności dynamiczne.

Logarytmiczny dekrement tłumienia  $\eta$  wyznaczono według wzoru

$$\eta = \frac{1}{p} \ln \frac{A_n}{A_{n+p}}$$

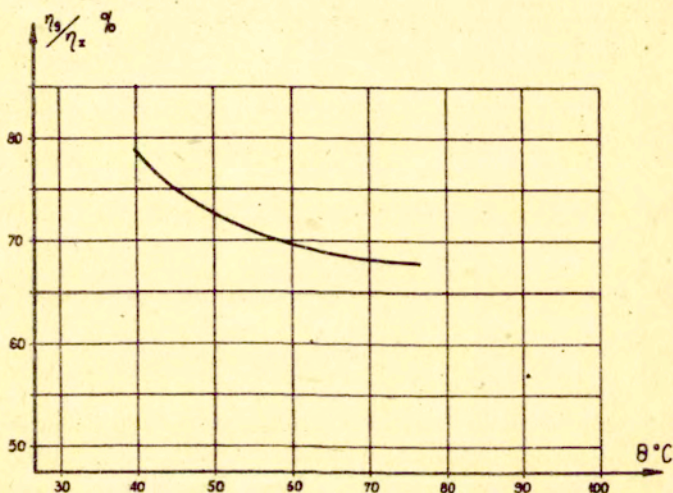
gdzie  $A_n$  i  $A_{n+p}$  - odpowiednio  $n$ -ta i  $(n+p)$ -ta amplituda zanikających drgań swobodnych.

Do obliczenia  $\eta$  wybrano charakterystyczne wartości amplitud i na ich podstawie wyznaczone kilka wartości  $\eta_i$  oraz logarytmiczny dekrement tłumienia jako średnią arytmetyczną

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \eta_i$$



Logarytmiczny dekrement tłumienia wyznaczono dla próbki "zimnej" i "gorącej", tzn. o temperaturze otoczenia i po ustaleniu się równowagi termicznej. We wszystkich badanych próbkach stwierdzono, że tłumienie było mniejsze dla sprężyny gorącej. Spadek tłumienia próbki "gorącej" w odniesieniu do próbki "zimnej" był tym większy im do wyższej temperatury próbka się nagrzewała. Temperaturową zależność spadku logarytmicznego dekrementu tłumienia dla próbki "gorącej" w odniesieniu do "zimnej" przedstawiono na rys.13.

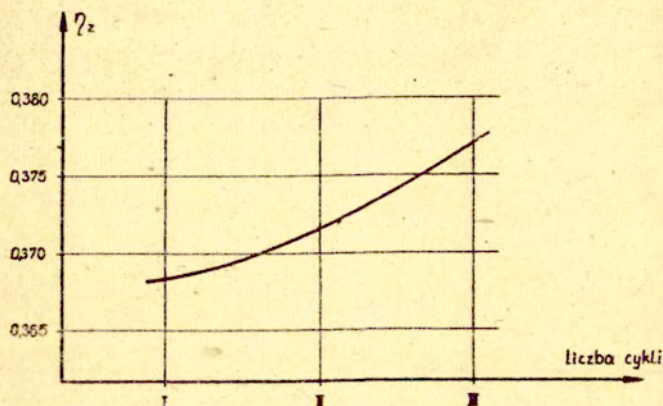


Rys.13.

Na wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia wpływa także liczba cykli obciążenia dynamicznego. Świadczy o tym zależność dekrementu tłumienia sprężyny zimnej od liczby cykli /rys.14/.

Zmiana własności tłumiących w wyniku samodzielnego nagrzewania się obciążonej dynamicznie sprężyny gumowej ma istotny wpływ na równowagę dynamiczną układu mechanicznego, w którym

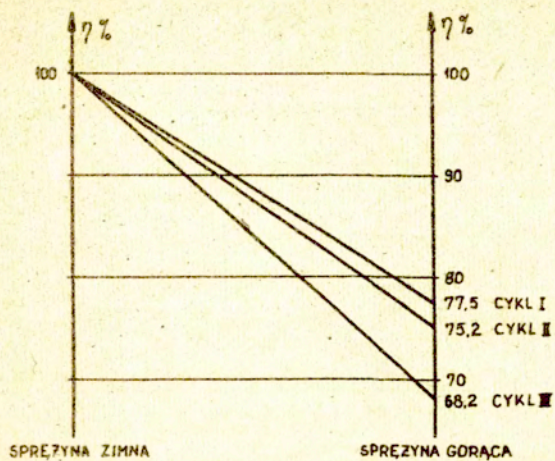
ta sprężyna pracuje. Dlatego zjawisko to jest ważne z praktycznego punktu widzenia. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, że elementy gumowe są zazwyczaj dobierane na podstawie ich własności statycznych, natomiast z reguły pracują w warunkach obciążeń dynamicznych.



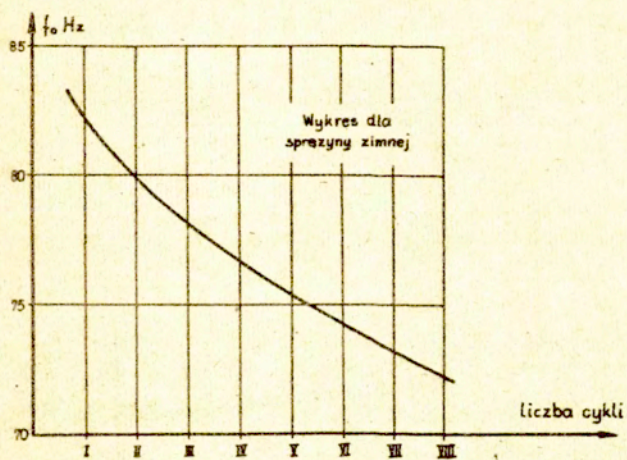
Rys. 14.

Jak wynika z rysunku 15, elementy gumowe o podwyższonej temperaturze wykazują spadek logarytmicznego dekrementu tłumienia - w stosunku do elementu "zimnego" - o około 22% w przypadku niewielkiej liczby cykli i około 32% w przypadku obciążenia długotrwałego.

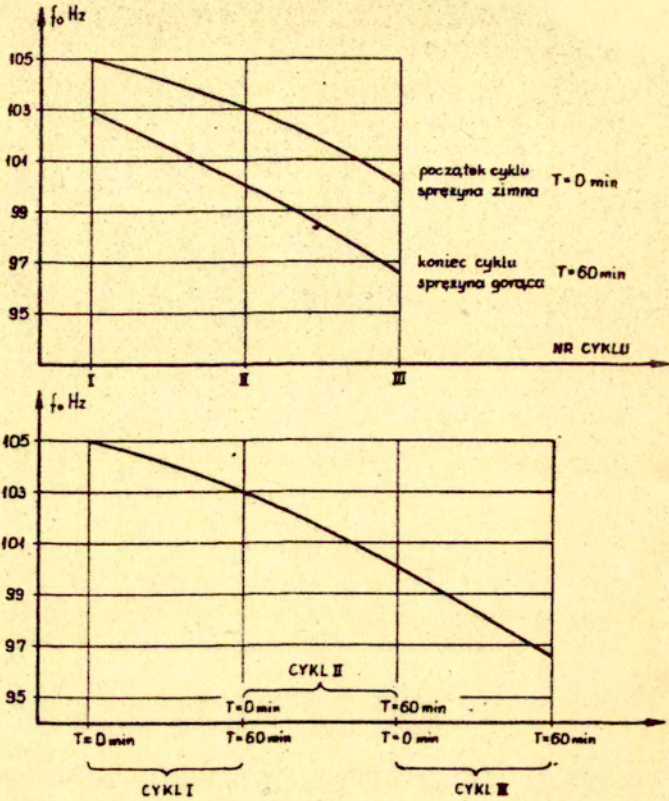
W mniejszym stopniu zmienia się częstość drgań rezonansowych. Długotrwałe obciążenie dynamiczne obniża częstość drgań rezonansowych /rys. 16 i 17/. Natomiast zmiana częstości drgań rezonansowych po ustaleniu się równowagi termicznej /element "gorący" / w stosunku do elementu "zimnego" jest bardzo mała; wynosi około 2 - 3%, a więc leży w granicach błędów pomiaru /rys. 18/. Z rysunku tego wynika, że przy wzroście temperatury elementu gumowego występuje tendencja do obniżania częstości drgań rezonansowych.



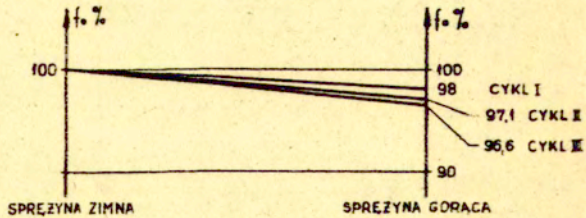
Rys. 15.



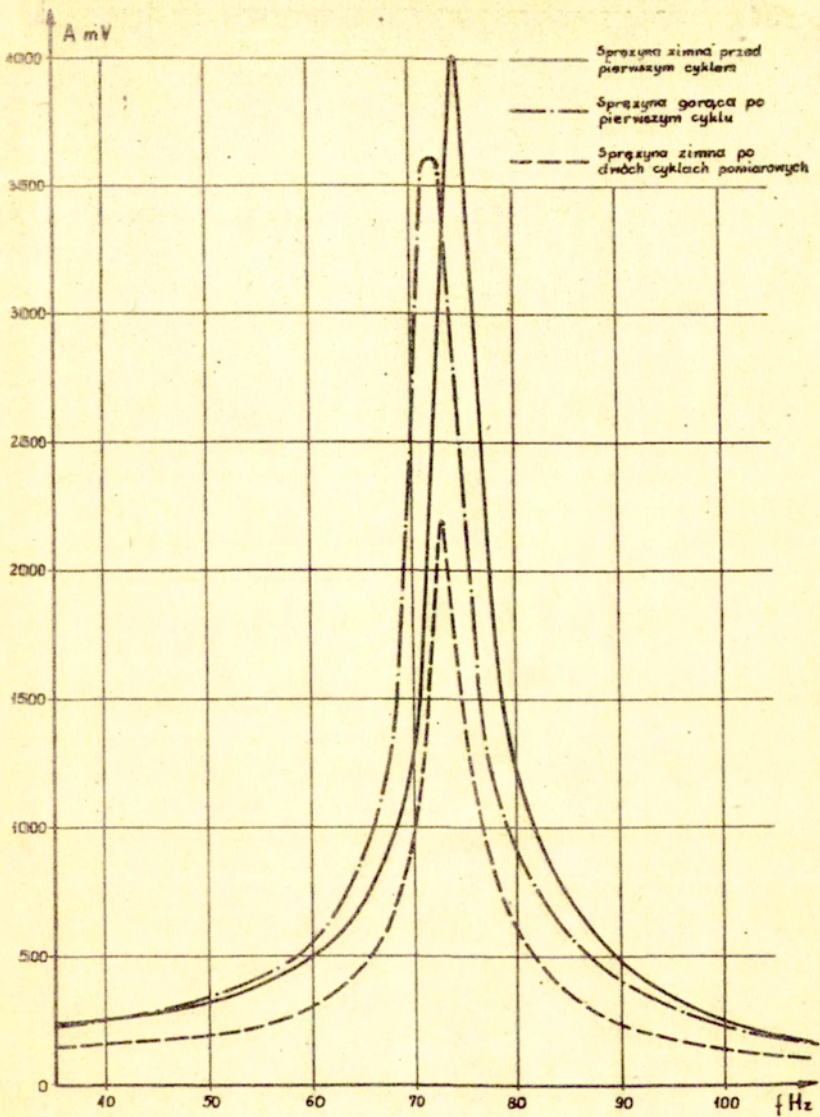
Rys. 16.



Rys. 17.



Rys. 18.



Rys. 19.

Omówiona wyżej zmienność parametrów jest przyczyną zmienności charakterystyk częstotliwościowych np. na rys. 19, gdzie przedstawiono charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe otrzymane dla próbki "zimnej" i "gorącej". Zwraca uwagę fakt wpływu liczby cykli obciążenia. Wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia wyraźnie maleje wzmocnienie częstotliwości rezonansowej.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały zależność własności dynamicznych sprężyny gumowej, reprezentowanych przez logarytmiczny dekrement tłumienia i częstość drgań rezonansowych, od temperatury. Zaobserwowano również wpływ czasu obciążenia na własności dynamiczne. Zmienność własności elementów gumowych może mieć duży wpływ na zakłócenia równowagi dynamicznej układów mechanicznych zawierających takie elementy.

Analiza wyników pomiarów pozwala sformułować następujące wnioski:

1. Temperatura badanych elementów gumowych poddanych obciążeniom dynamicznym rośnie proporcjonalnie do intensywności /amplitudy/ obciążenia.

2. Wyraźny wzrost temperatury występuje w zasadzie tylko przy wymuszeniach o częstości rezonansowej, tzn. temperatura zależy od wielkości odkształceń elementu gumowego.

3. Rozkład temperatur na powierzchni elementu gumowego wykonanego z materiału jednorodnego jest symetryczny.

4. Przy stałej temperaturze elementu gumowego logarytmiczny dekrement tłumienia rośnie z czasem obciążenia.

5. Elementy gumowe o niższej temperaturze wykazują większe tłumienie.

6. Wzrost temperatury i czas trwania obciążenia powodują nieznaczną zmianę częstości drgań rezonansowych układu. Przy stałej masie wniosek ten można odnieść do sztywności elementu gumowego. Można zauważyć tendencję do obniżania się sztywności wraz ze wzrostem temperatury.

7. Temperatura wewnątrz elementu gumowego nagrzewającego się samoistnie pod działaniem obciążenia zewnętrznego jest większa wewnątrz niż na powierzchni i rośnie w miarę zbliżania

się do środka. Szybkość narastania i poziom ustalonej temperatury były większe w elemencie gumowym, w którym zachodził proces starzenia się materiału.

Przedstawione wyżej wnioski dotyczą zmian temperatury wynikających z samoistnego nagrzewania się elementu gumowego poddanego obciążeniom dynamicznym.

#### Literatura

- 1 OLIFERUK W., SITAREK I., WICHER J. - Badanie wpływu temperatury na własności dynamiczne materiału wibroizolacyjnego, Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, Kraków 1979.
- 2 FERRY J.D. - Lepkosprężystość polimerów, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1965.
- 3 SNOWDON J.C. - Vibration Isolation; Use and Characterization The Journal of the Acoustical Society of America; Vol.66 No.5, November 1979.
- 4 SNOWDON J.C. - Rubberlike Materials, Their Internal Damping and Role in Vibration Isolation; Journal of Sound and Vibration; April 1965; Vol.2, No.2.

Spis treści	Str.
1. Wstęp . . . . .	3
2. Metoda i warunki pomiarów . . . . .	9
3. Badanie wzrostu temperatury elementu gumowego sprężyny poddanej działaniu obciążeń dynamicznych . . . . .	11
4. Analiza zmienności parametrów charakteryzujących własności dynamiczne . . . . .	16
5. Podsumowanie . . . . .	22
Literatura . . . . .	23