

Róża SOKOŁOWSKA

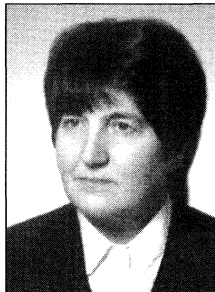
ZAKŁAD MECHANIKI STOSOWANEJ POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Tadeusz MAJEWSKI

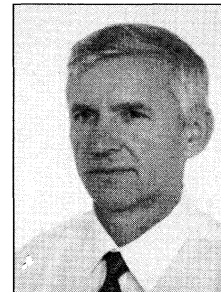
UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS-PUEBLA, MEXICO

Dynamiczny pomiar własności lepko-sprężystych taśm**Dr inż. Róża SOKOŁOWSKA**

Ukończyła studia na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej, tam też uzyskała stopień doktora nauk technicznych. Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Zakładzie Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Obecnie prowadzi prace badawcze w dziedzinie dynamiki maszyn i wibrotechniki. Jest autorem lub współautorem 32 publikacji w czasopiśmie naukowych i materiałach konferencyjnych krajowych i zagranicznych. Głównym obszarem zainteresowań są: dynamika, drgania i modelowanie układów mechatronicznych.

**Dr hab. inż. Tadeusz MAJEWSKI**

Jest profesorem w Universidad de las Americas-Puebla w Meksyku (od roku 1997) oraz profesorem wizytującym w uniwersytetach USA. Ukończył Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej. Stopień doktora habilitowanego otrzymał na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej w roku 1996. Jest autorem łącznie kilkudziesięciu publikacji w czasopiśmie krajowych i zagranicznych oraz wygłoszonych i opublikowanych referatów na konferencjach krajowych i międzynarodowych, jest autorem 5 patentów. Jego zainteresowania naukowe dotyczą dynamiki urządzeń mechatronicznych synchronizacji, drgań i samoczynnej eliminacji drgań.

**Streszczenie**

Określono wielkości charakteryzujące zachowanie się materiałów lepko-sprężystych w warunkach obciążeń dynamicznych. Posługując się modelem Kelvina-Voigta, zaproponowano sposób wyznaczenia metodą dynamiczną, zespolonego modułu sprężystości podłużnej. Przedstawiono stanowisko pomiarowe do wyznaczenia własności lepko-sprężystych taśm poliesterowych.

Abstract

The parameters describing the viscoelastic properties of tapes and fibres were defined for dynamic loading. The method of measuring these properties was proposed and a laboratory test stand was built. A series of experiments was carried out which used a model of Kelvin-Voigt in which the complex modulus was defined.

Słowa kluczowe: reologia, relaksacja, lepko-sprężystość, tłumienie drgań, moduł zespolony

Keywords: rheology, relaxation, viscoelasticity, material damping, complex modulus

1. Wprowadzenie

Polimery i tworzywa sztuczne mają wiele swoistych cech, takich jak mały ciężar właściwy, odporność na czynniki atmosferyczne, termostabilność, trwałość oraz przetwarzalność. Charakteryzują się one dość dużą wytrzymałością mechaniczną oraz własnościami reologicznymi.

Właściwości mechaniczne tworzyw sztucznych najczęściej określa się wyznaczając dopuszczalne naprężenia i odkształcenia podczas pełzania, wielkość strat energetycznych, udarności, twardości i wytrzymałości zmęczeniowej. Odkształcenia tych materiałów wywołane obciążeniem są zależne od historii i prędkości obciążania [1-8].

Podczas oznaczania powyższych własności materiałowych, istotnymi parametrami, które należy uwzględnić są:

- temperatura - ze wzrostem temperatury moduł Younga polimerów maleje, w niskich temperaturach polimery wykazują moduł Younga ok. 1-10 GPa, w wysokich temperaturach ich moduł Younga wynosi ok. 1-10 MPa,
- czas - charakterystyczną cechą materiałów lepko-sprężystych jest to, że ze wzrostem prędkości obciążenia zwiększa się wartość naprężenia koniecznego do uzyskania danego odkształcenia.

Zachowanie lepko-sprężyste [7] materiałów przejawia się w badaniach dynamicznych. Z uwagi na reologiczne zachowanie się polimerów i tworzyw sztucznych ich własności zależą od czasu trwania naprężeń (tzw. pełzanie materiału), zatem dla tych materiałów w warunkach obciążeń quasi-statycznych rozróżnia się:

$$\text{- moduł relaksacji: } E_r(t, \epsilon) = \frac{\sigma(t, \epsilon)}{\epsilon_0}$$

$$\text{- moduł pełzania: } E_p(t, \sigma) = \frac{\sigma_0}{\epsilon(t, \sigma)}$$

gdzie: ϵ_0 - wydłużenie względne, σ_0 - naprężenie normalne.

2. Cechy charakterystyczne materiałów reologicznych

Materiały reologiczne charakteryzują się tym, że istnieje ścisła zależność od czasu w związkach między stanem odkształcenia i naprężenia. Reologiczne ogólne równanie stanu jest określone w sposób następujący:

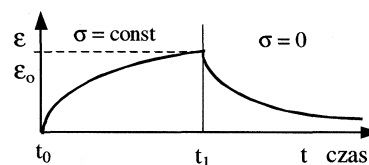
$$F(\sigma, \epsilon, t) = 0$$

gdzie: σ - naprężenia, ϵ - odkształcenia względne, t - czas.

Czas w równaniach reologicznych jest zmienną niezależną. W równaniach różniczkowych stanu istnieją pochodne naprężeń i odkształceń względem czasu. Materiały reologiczne pod wpływem obciążeń wykazują cechy sprężystego ciała stałego i lepkiej cieczy, zatem istnieje potrzeba wyznaczenia zespolonego modułu Younga dla tych materiałów w celu określenia ich własności mechanicznych.

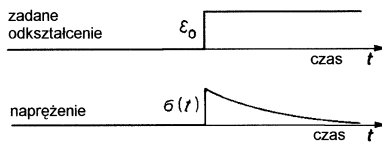
Mechaniczne zachowanie się materiałów reologicznych, jakimi np. są polimery, jest inne od zachowania się modelu ciała idealnie sprężystego, podlegającego prawu Hooke'a ponieważ ich mechaniczne własności zależą od prędkości przyrostu obciążenia i temperatury.

Jedną z dominujących cech tych materiałów, to zjawisko pełzania pod działaniem stałego obciążenia np. $\sigma = \text{const}$, (w czasie $t_0 - t_1$), jak pokazano na rys. 1.



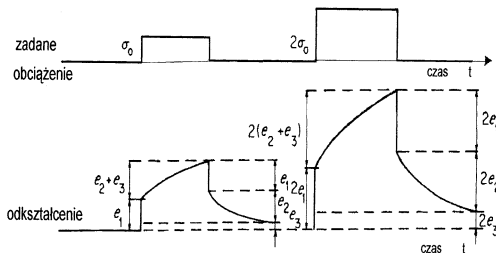
Rys. 1. Krzywa pełzania
Fig. 1. Creep characteristic

Przeciwnym odpowiednikiem do pełzania jest relaksacja naprężeń, podczas której po pewnym czasie w materiale poddanym wstępnemu stałemu odkształceniu ϵ_0 , nastąpi spadek naprężenia $\sigma(t)$ jak to przedstawiono na rys. 2. W przypadku relaksacji naprężeń, istnienie lepkiego płynięcia oddziałuje na zmniejszenie wartości naprężenia, które po dostatecznie długim czasie może opaść do zera (rys. 2).



Rys. 2. Relaksacja naprężeń
Fig. 2. Relaxation of material

Na rys. 3 przedstawiono przykładowy sposób obciążenia na dwu poziomach zadanych naprężeń σ_0 oraz $2\sigma_0$ i odpowiadającym tym stanom odkształceń, funkcji czasu, dla ciała liniowo lepko-sprężystego.



Rys. 3. Deformacja materiału lepko-sprężystego
Fig. 3. Deformation of viscoelastic material

Z badań [1], [5], [7] wynika, że całkowite odkształcenie materiału lepko-sprężystego ϵ jest funkcją czasu i składa się z trzech oddzielnych części, są to:

- ϵ_1 - natychmiastowe sprężyste odkształcenie,
- ϵ_2 - opóźnione sprężyste odkształcenie,
- ϵ_3 - tzw. płynięcie newtonowskie.

W przypadku materiału sprężystego odkształcenia odwzorowują ściśle program obciążenia, proporcjonalnie do wartości przyłożonego obciążenia.

Boltzman [1], [7] określił pojęcie liniowej lepko-sprężystości w postaci związków między napięciem a odkształceniem. Jest to pierwsza matematyczna relacja zachowania się liniowo lepko-sprężystego materiału. W przypadku wielostopniowego programu obciążenia można wyrazić ją całką Duhamela:

$$\epsilon(t) = \int_{-\infty}^t J(t-\tau) d\sigma(\tau) \quad (1)$$

gdzie: $\epsilon(t)$ - jest całkowitym odkształceniem, $J(t-\tau)$ jest tzw. funkcją podatności pełzania.

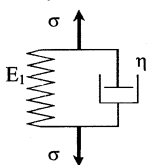
Granice całkowania obejmują przedział $(-\infty, t)$, ponieważ należy w tym opisie uwzględnić wszystkie przeszłościowe obciążenia badanego elementu. Wynika to z hipotezy, na której opiera się zasada superpozycji Boltzmana w celu opisanego odkształceń relaksacyjnych liniowego, lepko-sprężystego materiału.

Główne tezy zasady superpozycji Boltzmana są następujące:

- pełzanie próbki jest funkcją całkowitej historii obciążenia,
- każde obciążenie w czasie ma swój niezależny udział w końcowej deformacji obciążanego elementu.

3. Dynamiczny model materiału lepko-sprężystego

Do opisanego dynamicznych, lepko-sprężystych własności materiałów reologicznych można wykorzystać model Kelvina-Voigta zbudowany z elastycznych sprężyn podlegających prawu Hooke'a oraz połączonych równolegle, lepkich tłumików podlegających prawu lepkości Newtona. Opór jaki przedstawiony układ stawia zewnętrznemu obciążeniu, jest sumą oporu sprężyny i oporu tłumika (rys. 4).



Rys. 4. Model materiału lepko-sprężystego
Fig. 4. Viscoelastic material

Reologiczne równanie stanu modelu pokazanego na rys. 4 ma postać:

$$\sigma = E_1 \epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt} \quad (2)$$

gdzie: σ - napięcie sumaryczne, E_1 - stała sprężysta (tzw. dynamiczny moduł sprężystości), η - współczynnik lepkości (określający tłumienie wiskotyczne)

Eksperymentalna procedura w badaniu efektów pełzania i relaksacji napiężeń polega na poddaniu badanej próbki materiałowej zmiennym odkształceniom z równoczesnym pomiarem napiężeń, które je wywołują.

W warunkach zmiennych napiężeń (podczas gdy materiał zostaje poddany drganiom harmonicznym) następuje dyssypacja energii, zaś napięcia σ są przesunięte w fazie β w stosunku do odkształcenia ϵ , wynikające ze zmiennych harmonicznie obciążeń odkształcenia mają postać:

$$\epsilon = \epsilon_0 \sin \omega t \quad \text{oraz} \quad \sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \beta)$$

wówczas:

$$\sigma = \sigma_0 \cos \beta \sin \omega t + \sigma_0 \sin \beta \cos \omega t$$

Wykorzystując zmodyfikowane prawo Hooke'a można otrzymać wyrażenie na moduł Younga postaci:

$$E = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \omega t \cos \beta + \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \omega t \sin \beta \quad (3)$$

Stąd wynika, że związek napięcie-odkształcenie może być określony dwiema wielkościami E_1 oraz E_2

$$\sigma = \epsilon_0 E_1 \sin \omega t + \epsilon_0 E_2 \cos \omega t \quad (4)$$

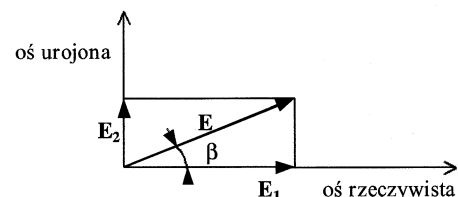
gdzie:

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \beta$$

oraz

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \beta$$

To narzuca bezpośrednio zespolony zapis modułu Younga, jak pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Zespolony moduł Younga $E = E_1 + iE_2$
Fig. 5. Complex modulus

Korzystając ze wzoru Euler'a otrzymamy wielkość odkształcenia w postaci wykładniczej:

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{i\omega t} = \epsilon_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t) \quad (5)$$

podobnie napięcie jako funkcja wykładniczą tzn.

$$\sigma = \sigma_0 e^{i(\omega t + \beta)} \quad (6)$$

wówczas:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} e^{i\beta} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} (\cos \beta + i \sin \beta)$$

stąd wyrażenie na moduł Younga ma postać:

$$E = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} (\cos \beta + i \sin \beta) = E_1 + iE_2 \quad (7)$$

Z powyższych rozważań wynika że moduł dla materiałów lepko-sprężystych jest modułem zespolonym. Część rzeczywista modułu E_1 , która jest w fazie z odkształceniem, jest nazywana dynamicznym modułem sprężystości, ponieważ określa energię zmagazynowaną w materiale w wyniku powstałych odkształceń.

Urojona część modułu E_2 , która nie jest w fazie z odkształceniem określa rozproszenie energii i jest nazywana dynamicznym modułem lepkości (modułem strat).

W układzie liniowo-sprężystym pobudzonym do drgań swobodnych, naprężenie będzie zmieniać się harmonicznym, zatem zgodnie z zależnością (2):

$$\sigma = \varepsilon_0 (E \sin \omega t + \eta \omega \cos \omega t)$$

Zmianę naprężeń określa zależność:

$$\sigma = \varepsilon_0 E \sin(\omega t + \beta)$$

Wielkość E jest zastępczym modułem sprężystości:

$$E = \sqrt{E_1^2 + \eta^2 \omega^2} \quad (8)$$

Kąt przesunięcia fazowego β odkształceń względem naprężeń:

$$\beta = \arctg \frac{\eta \omega}{E} \quad (9)$$

gdzie: ω jest częstością kołową drgań tłumionych.

Zespolony moduł Younga jest zależny od temperatury i częstotliwości. Wielkość tego modułu zależy od struktury materiału, wiąże się on z czasem relaksacji, odpornością materiału na wibracje itp.

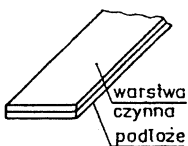
Matematyczną miarą zdolności tłumienia drgań jest logarytmiczny dekrement tłumienia, wykorzystuje się go przy stosowaniu metod dynamicznych do wyznaczania zespolonego modułu Younga.

4. Dynamiczny pomiar zespolonego modułu sprężystości podłużnej

Dla poznania lepko-sprężystego zachowania się materiału w warunkach dynamicznych można zastosować następujące metody badań:

- przez pomiar logarytmicznego dekrementu drgań tłumionych swobodnych
- stosując metody rezonansowe (pomiar amplitud drgań funkcji częstości wymuszeń)
- metody nierezonansowe drgań wymuszonych (pomiar lepko-sprężystych własności w zależności od częstości wymuszeń i od temperatury)
- metody propagacji fal (czynnej i odbitej)

Badania zespolonego modułu Younga są przydatne szczególnie dla materiałów w postaci taśm. Badania przeprowadzono dla taśm poliesterowych o budowie warstwowej. Taśmy takie składają się z dwóch warstw: podłoża i warstwy zawierającej materiał magnetyczny, nazywanej warstwą czynną taśmy (rys. 6).



Rys. 6. Taśma magnetyczna
Fig. 6. Magnetic tape (Magnetic coating; Base)

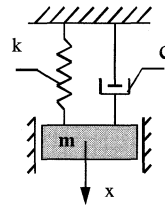
Wprowadzane są dodatkowe warstwy w celu poprawienia własności magnetycznych lub pewnych własności mechanicznych. Warstwa czynna nanoszona jest na podłoże poliesterowe w postaci lakiery będącego zawiesiną pigmentu magnetycznego w roztworze środków wiążących. Są to taśmy magnetyczne stosowane do zapisu i odtwarzania sygnałów fonii i wizji.

5. Metoda wyznaczania własności lepko-sprężystych taśm

Do wyznaczenia lepko-sprężystych własności taśm poliesterowych zaproponowano metodę pomiarową przyjmując następujące założenia modelowe:

- badany materiał (taśma) jest sprężysto-lepkim elementem w połączeniu równoległym z drgającą swobodnie masą m .
- masa m w tym modelu jest łączną masą ramki i czujnika układu pomiarowego
- układ drgający jest układem dyskretnym o jednym stopniu swobody

Zachowanie się materiału lepko-sprężystego w warunkach drgań odwzorowuje model pokazany na rys. 7. Zastępczy układ dynamiczny składa się z połączonych równolegle sprężyny i tłumika. Jest to dynamiczny model Kelvina-Voigta.



Rys. 7. Model dynamiczny Kelvina-Voigta
Fig. 7. Kelvin-Voigt model of material

Drgania tłumione swobodne masy wg rys. 7 opisywane są równaniem różniczkowym:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (10)$$

gdzie: x - współrzędna ruchu drgającego masy m , c - współczynnik oporu lepkiego, k - współczynnik sprężystości.

Po wprowadzeniu oznaczeń:

$$h = \frac{c}{2m}, \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

równanie (10) można zapisać jako:

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (11)$$

Rozwiązanie ogólne $x(t)$ tego równania przy założeniu warunków początkowych:

$$x(0) = x_0 \text{ oraz } \dot{x}(0) = 0 \quad (12)$$

przyjmuje postać:

$$x(t) = a_0 e^{-ht} \cos(\omega t - \varphi) \quad (13)$$

a_0 - początkowa amplituda drgań:

$$a_0 = \sqrt{x_0^2 + x_0^2 h^2 / \omega^2}$$

kąt fazowy drgań: $\varphi = \arctg \frac{h}{\omega}$

okres drgań tłumionych: $T = \frac{2\pi}{\omega}$

przy czym: $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}$

Dla małego tłumienia, tzn. gdy $h \ll \omega_0$, można przyjąć że:

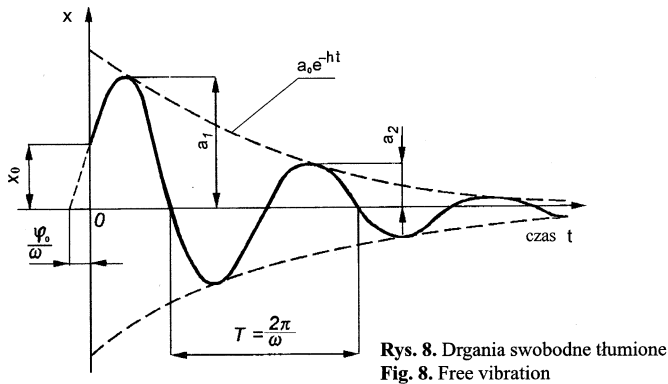
$$\omega \approx \omega_0, \quad a_0 \approx x_0 \quad (14)$$

Z równania (13) wynika, że w miarę upływu czasu drgania znikają, jak pokazano na rys. 8, są to drgania tłumione, ich amplituda maleje wykładniczo.

Wielkość tłumienia w układach drgających opisuje się za pomocą logarytmicznego dekrementu tłumienia δ , jest to logarytm naturalny

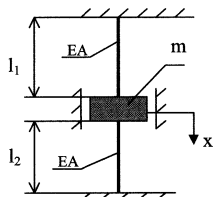
stosunku wartości kolejnych amplitud (np. w chwili t oraz w chwili $(t+T)$), zatem:

$$\delta = \ln \frac{a(t)}{a(t+T)} = \ln e^{hT} = hT \quad (16)$$



Rys. 8. Drgania swobodne tłumione
Fig. 8. Free vibration

Zaproponowano metodę wyznaczania zespolonego modułu Younga na podstawie przebiegu drgań swobodnych wzdłużnych masy zawieszona na dwóch odcinkach taśmy wykonanej z materiału lepkosprężystego.



Rys. 9. Model układu pomiarowego
Fig. 9. Laboratory stand design

Równanie ruchu masy m zawieszona jak na rys. 9 można zapisać w postaci zespolonej:

$$m\ddot{x} + (k_1 + ik_2)x = 0 \quad (17)$$

gdzie: $k = (k_1 + ik_2)$ jest zespoloną sztywnością zawieszenia

Sztywność układu drgającego wzdłużnie, składającego się z dwóch jednorodnych odcinków taśmy o długościach l_1 i l_2 połączonych równolegle wyraża się zależnością:

$$k = \frac{EA}{l_1} + \frac{EA}{l_2} \quad (18)$$

przy czym: $A = bs$ - pole przekroju poprzecznego, b - szerokość, s - grubość taśmy.

Sztywność układu drgającego k - jest funkcją zespolonego modułu E i wymiarów poprzecznych wg wzoru

$$k = k_1 + ik_2 = (E_1 + iE_2)A \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right) \quad (19)$$

Jeśli tłumienie jest małe, mniejsze od tłumienia krytycznego rozwiązanie równania ruchu (18) przyjmuje następującą postać:

$$x(t) = a_0 e^{-ht} \cos(\omega t - \varphi) \quad (20)$$

Podstawiając wartość otrzymaną ze wzoru (15) równanie ruchu jest następujące:

$$x(t) = a_0 e^{-\frac{\delta\omega}{2\pi}t} \cos(\omega t - \varphi) \quad (21)$$

Jeśli w układzie występuje małe tłumienie, to można przyjąć, że częstość kołowa drgań własnych jest zależna tylko od rzeczywistego współczynnika sztywności:

$$\omega^2 = \frac{k_1}{m} \quad (22)$$

Logarytmiczny dekrement tłumienia δ zgodnie ze wzorem (16) ma postać:

$$\delta = hT = h \frac{2\pi}{\omega}$$

zatem:

$$2h = \frac{k_2}{m} = \omega \frac{\delta}{\pi}$$

Porównując wykładniki potęg wyrażen (20) i (21) otrzymano:

$$-ht = -\frac{\delta\omega}{2\pi}t = -\frac{k_2}{2m\omega}t \quad (23)$$

Skąd można wyliczyć wartość urojonego współczynnika sztywności:

$$k_2 = \frac{\delta\omega^2 m}{\pi} \quad (24)$$

Znając okres drgań i logarytmiczny dekrement tłumienia z zależności (22) i (24) można wyznaczyć składowe zespolonego modułu sprężystości podłużnej, a zatem:

- dynamiczny moduł sprężystości E_1 :

$$E_1 = \frac{\omega^2 m l_1 l_2}{A(l_1 + l_2)} = \frac{4\pi^2 m l_1 l_2}{T^2 A(l_1 + l_2)} \quad (25)$$

- dynamiczny moduł lepkości E_2 :

$$E_2 = \frac{\delta\omega^2 m l_1 l_2}{\pi A(l_1 + l_2)} = \frac{4\pi \delta m l_1 l_2}{T^2 A(l_1 + l_2)} \quad (26)$$

Współczynnik strat wyznaczony jest jako stosunek obu modułów

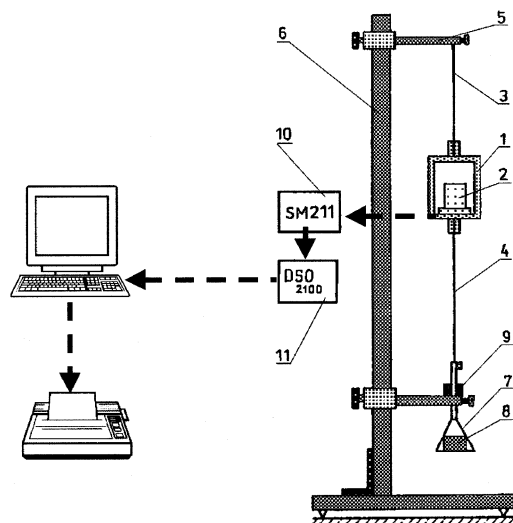
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\delta}{\pi} = \text{tg } \beta \quad (27)$$

Współczynnik ten określa zdolność tłumienia drgań polimerów. Przyjmuje się, że jeżeli jego wartość $> 0,1$, to tworzywa mają zdolność dużego tłumienia.

W celu potwierdzenia danych literaturowych oraz wyznaczenia zespolonego modułu dla innych materiałów wykonanych z tworzyw sztucznych zaprojektowano własne stanowisko badawcze.

6. Opis stanowiska badawczego

Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Stanowisko pomiarowe
Fig. 10. Instrument for test

Stanowisko posiada przetwornik piezoelektryczny (2) typu KD 35, który jest połączony jest z miernikiem drgań (10) typu SM-211. Przyspieszenie, jakiemu podlega masa przetwornika jest odwzorowaniem wartości ładunku (napięcia) na wyjściu z przetwornika. Sygnał ten jest wzmacniany, a następnie całkowany jednokrotnie lub dwukrotnie, jako sygnał prędkości lub przesunięcia.

W ten sposób może być zarejestrowana amplituda drgań czujnika Czujnik wraz z ramką ma masę $m = 56$ g. Do miernika drgań podłączona jest karta oscyloskopowa (11) typu DSO-2100. Zapisu drgań dokonano za pomocą oprogramowania WIN 95/98. Zapisane cyfrowo przebiegi czasowe tłumionych drgań taśmy odwzorowano graficznie.

Do ramki (1) i wsporników górnego (5) i dolnego (6), zamocowano badane taśmy (3), (4). W ramce znajduje się czujnik piezoelektryczny (2). Przed ostatecznym zamocowaniem taśmy do dolnego wspornika należy wprowadzić siłę naciągu taśmy. Istnieje możliwość badania taśm i włókien różnej długości, siłę naciągu taśm można regulować.

Wzbudzenia drgań czujnika dokonuje się przez impulsowe przyłożenie siły wzdłużnej (np. uderzenie ciężarkiem (9) lub z generatora impulsów B-K).

Czas trwania impulsu uderzeniowego ma duży wpływ na reakcję przyrządu, który ma mierzyć amplitudę. Filtr stosowany w przyrządzie pomiarowym eliminuje częstotliwości zbliżone do częstotliwości własnych czujnika pomiarowego. Impuls wymuszający drgania układu powinien być krótki w porównaniu z okresem drgań swobodnych czujnika.

Taśmy użyte w badaniach wymagają naciągu wstępnego taśmy. Małe siły naciągu powodują występowanie drgań poprzecznych. Pomiar statyczny daje duży błąd, stąd zdecydowano się użyć metody pomiaru z naciągami wstępnymi taśmy.

7. Podsumowanie

Zastosowane rozwiązanie układu pomiarowego pozwala na pomiar własności tłumiących materiału taśmy. Ważne jest to dla zdefiniowania jej własności dynamicznych blisko punktu pracy np. głowicy magnetycznej w rejestratorach magnetycznych lub urządzeniach do zapisu fonii i wizji.

Przedstawiona metoda badania została w pełni i z powodzeniem zrealizowana do określenia dynamicznego modułu sprężystości i modułu dynamicznego lepkości taśm poliestrowych. Ma ona zastosowanie w pomiarach własności lepko-sprężystych materiałów takich jak druty, nici, włókna, taśmy itp.

Dokładność wyznaczania zespolonego modułu Younga uwarunkowana jest instrumentalnymi i metodycznymi błędami aparatury pomiarowej oraz błędami obliczeń. Z analizy błędów pomiarowych można szacować, że sumaryczny błąd względny otrzymywanych wyników nie przekracza 1%.

8. Bibliografia

1. Ferry J. D.: Lepkosprężystość polimerów. WNT, Warszawa 1965
2. Libura B.: Taśmy magnetyczne. WkiŁ, Warszawa 1976
3. Lipka J., Majewski T.: Laboratorium dynamiki układów mechanicznych. WPW, Warszawa 1983
4. Osiński Z.: Tłumienie drgań mechanicznych. PWM, Warszawa 1998
5. Pindera J.T.: Reologiczne własności materiałów modelowych. WNT, Warszawa 1962
6. Reiner M.: Reologia teoretyczna. WNT 1968
7. Ward J.M.: Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych. PWN, Warszawa, 1975
8. Żuchowska D: Polimery Konstrukcyjne. WNT, Warszawa 1995

Title: Dynamical Measurement of the Properties of Viscous-Elastic Tapes

Artykuł recenzowany



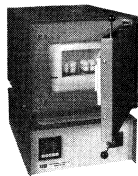
Przemysłowy Instytut Elektroniki

ul. Długa 44/50, 00-241 Warszawa

Tel.: (22) 635 54 78 fax: (22) 831 30 14

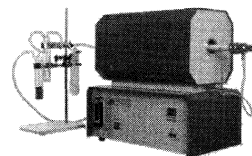
Oferuje:

Aparaturę kontrolno-pomiarową do badania parametrów fizykochemicznych paliw stałych:



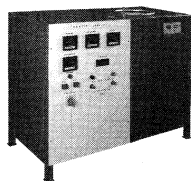
Analizatory do oznaczania zawartości:

- siarki
- węgla
- części lotnych
- popiołów



Analizatory gazotwórczości w masach formierskich

Aparaturę kontrolno-pomiarową do badań i obróbki cieplnej materiałów



Analizatory do oznaczania:

- wskaźnika samozapalności węgla
- charakterystycznych punktów topliwości popiołów
- temperatur przemian fazowych, kąta zwizalności
- napięcia powierzchniowego
- reakcyjności koksu wielkopieczowego

Urządzenia do badania uzysku koksu i węgl pochodnych