

# Analiza procesa lezenja viskoelastičnih materialov pod vplivom strižne obremenitve

## On the Analysis of Creep Behavior of Viscoelastic Materials in Shear

P. Metlikovič, Sava Kranj, Razvojni Tehnološki Inštitut, Škofjeloška cesta 6, Kranj

I. Emri, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za eksperimentalno mehaniko, Aškerčeva 6, Ljubljana

*Predstavljen je merilni sistem, namenjen merjenju funkcije strižnega (torzijskega) modula lezenja, ki je bil razvit in izdelan v Laboratoriju za eksperimentalno mehaniko, Fakultete za strojništvo. Trenje v merilni napravi je minimizirano z vleženjem gibljivih delov v aerostatičnih ležajih. Najmanjši moment obremenitve je  $3.2 \cdot 10^{-5}$  Nm, najmanjši merljivi zasuk pa je  $5 \cdot 10^{-6}$  rad. Preizkušane se nahaja v termični komori, grajeni za temperature od  $-100^{\circ}\text{C}$  do  $250^{\circ}\text{C}$ . Predstavljeni so tudi rezultati prve meritve, izvedene na suhih preizkušancih iz poli-vinil-acetata pri temperaturah okoli steklastega prehoda.*

*Ključne besede: Lezenje, merilna naprava, materialne funkcije*

*A new apparatus for characterization of a shear creep compliance function is presented. The apparatus has been developed in the Laboratory of Experimental Mechanics at the Faculty of Mechanical Engineering. To minimize frictional forces all moving parts are embedded in air bearings. The lowest torque, applied to the specimen, and the smallest measurable angle of deformation are  $3.2 \cdot 10^{-5}$  Nm and  $5 \cdot 10^{-6}$  rad, respectively. The apparatus is equipped with the environmental chamber constructed for temperatures from  $-100^{\circ}\text{C}$  to  $250^{\circ}\text{C}$ . As an example the results on creep behavior of dry PVAc are presented.*

*Key words: Creep, creep apparatus, material functions*

### 1 Uvod

Za razliko od kovinskih materialov, se mehanske lastnosti polimerov pri obremenitvi močno spreminjajo s časom (tipično za faktor  $10^5$ ). Ta časovna odvisnost je nadalje funkcija temperature in relativne vlažnosti, katerim je material izpostavljen. Za razliko od linearnih zvez med napetostnim in deformacijskim stanjem, ki jih uporabljamo v klasični elasto in plasto mehaniki je za primer viskoelastičnih materialov, kar polimeri so, napetostnodeformacijska zveza podana v obliki konvolucijskih (Stieltjesovih) integralov. Materialne konstante (module) nadomestijo materialne funkcije, ki so definirane kot odziv materiala na koračno obremenitev v obliki napetosti ali deformacije. V primeru, ko je obremenitev napetost, imamo opraviti s procesom lezenja, ko je obremenitev deformacija pa s procesom relaksacije materiala. Poudariti je potrebno, da tako dobljeni materialni funkciji (funkcija lezenja in funkcija relaksacije) nista algebraično obrnljivi. Zato je potrebno vsako od teh funkcij določiti z ločenimi eksperimenti.

### 2 Definicija problema

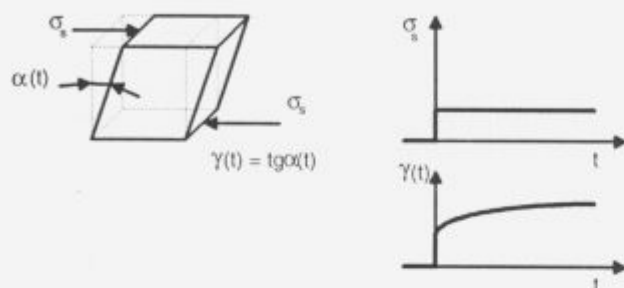
Kot rečeno, mehanske lastnosti polimerov se s časom, temperaturo, vlažnostjo in velikostjo mehanske obremenitve zelo spreminjajo. Zato so za meritve materialnih funkcij potrebne čim natančnejše naprave z možnostjo nadzorovanja deformacij,

napetosti, temperature in po možnosti še vlage in tlaka. V primeru, ko je obremenitev statična, lahko napetostno-deformacijsko stanje materiala popišemo, če poznamo vsaj dve materialni funkciji in njuna inverza. Merjenje Poissonovega modula je izjemno zahtevna naloga, zato se v praksi ponavadi odločimo za merjenje strižnega, enoosnega in/ali volumnskega modula. Oblika materialne funkcije je odvisna od vrste obremenitve. Če je obremenitev sila (napetost) dobimo funkcijo lezenja, ko je obremenitev deformacija pa relaksacijsko funkcijo. Za primer strižne, enoosne in volumnske obremenitve sta ti funkciji označeni z  $J(t)$  in  $G(t)$ ,  $D(t)$  in  $E(t)$  ter  $M(t)$  in  $K(t)$ <sup>1</sup>. Od naštetih je merjenje strižnega modula lezenja najzanesljivejše, zato se v praksi tudi najpogosteje uporablja<sup>1-3</sup>. Iz istega razloga smo se tudi mi odločili za merjenje strižnega modula lezenja.

V skladu z linearno teorijo viskoelastičnosti<sup>1</sup>, so moduli definirani kot razmerje med posledico in vzrokom, kjer ima vzrok obliko koračne obremenitve. Modul lezenja za strižno (torzijsko) obremenitev v obliki torzijske napetosti je tako definiran:

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_s}$$

Shematsko je meritev prikazana na **sliki 1**, kjer je  $\sigma_s$  vsiljena strižna napetost v obliki koračne funkcije,  $\gamma(t)$  pa je naraščajoča strižna deformacija. Cilj naloge je bil razviti in izdelati merilno napravo, ki bo omogočala merjenje strižnega modula lezenja v okvirih veljavnosti linearne teorije viskoelastičnosti.



**Slika 1.** Meritev lezenja pri strižni obremenitvi.  
**Figure 1.** Principle of the creep measurements in shear.

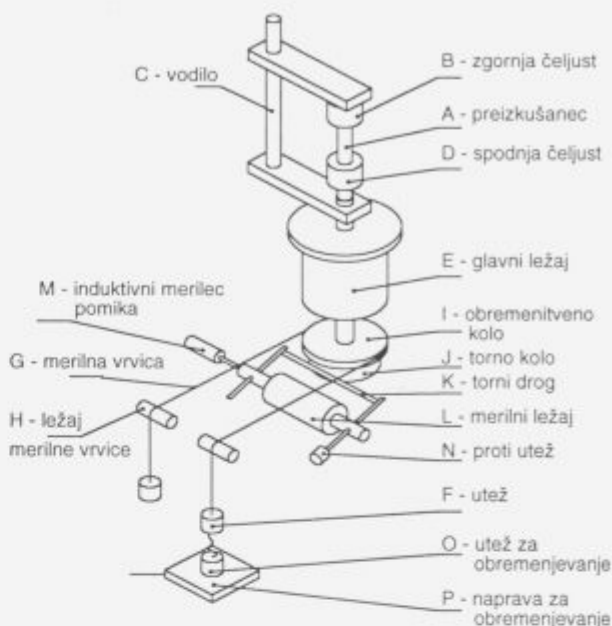
### 3 Opis izdelanega merilnega sistema

Merilni sistem, ki je bil razvit, je sestavljen iz treh glavnih sklopov. Prvi sklop je mehanska naprava, ki omogoča torzijsko obremenjevanje preizkušanca, drugi sklop predstavlja termična komora in zadnji je merilna in regulacijska veriga z računalnikom in programsko opremo<sup>4</sup>. Shema merilne naprave je prikazana na **sliki 2**, fotografija izdelane naprave pa na **sliki 3**.

V skladu z linearno teorijo viskoelastičnosti so materialne funkcije definirane kot odziv na infinitezimalno (v praksi zelo majhno) obremenitev. Tej zahtevi se lahko približamo z minimizacijo trenja v vseh gibljivih delih merilne naprave. Odločili smo se za izvedbo vleženja v aerostatičnih ležajih, obremenjevanja z utežjo in merjenjem zasuka s pretvorbo rotacije v translacijo, podobno kot pri Kennerjevem aparatu<sup>5</sup>.

Preizkušavec **A** je pritrjen v zgornjo mirujočo - **B** in spodnjo gibljivo - **D** čeljust. Spodnja čeljust, ki je vodena v aksialno-radialnem aerostatičnem ležaju **E**, je togo povezana s kolutom **I**, s pomočjo katerega preizkušavec obremenjujemo s konstantnim momentom. Obremenitev preizkušanca s torzijskim momentom izvedemo z utežjo **O**, ki jo spustimo z napravo za spuščanje **P**. Utež **O** je obešena na vrstico **G**, speljano okrog koluta **I**. Na oba konca vrstice sta obešeni še dve enako veliki uteži **F**, ki zagotavljata potrebno silo za napenjanje vrstice in trenje med vrstico in kolutom **I**. Vodenje vrstice je izvedeno s pomočjo dveh radialnih aerostatičnih ležajev **H**. Deli **K**, **L**, **N** sestavljajo mehanizem, ki pretvori zasuk (deformacijo) preizkušanca v translacijo, ki jo merimo s senzorjem pomika **M**.

Najmanjši moment obremenjevanja, s katerim se lahko izvajamo zanesljive meritve, je  $3.2 \cdot 10^{-6}$  Nm. Določili smo ga z velikostjo uteži, ki je ravno še povzročila zanesljiv premik naprave brez preizkušanca v obe smeri čez celotno merilno območje.



**Slika 2.** Shema merilne naprave.  
**Figure 2.** Schematic of the measuring system.



**Slika 3.** Fotografija izdelane naprave.  
**Figure 3.** Photo of the measuring system.

Drugi del sistema predstavlja termična komora, ki omogoča vzdrževanje izotermnih pogojev v temperaturnem območju od  $-100^{\circ}\text{C}$  do  $250^{\circ}\text{C}$  z natančnostjo  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  v časovnem intervalu  $10^4$  sekund.

Tretji del merilnega sistema je sestavljen iz več delov. Na mehanskem delu naprave imamo mehanizem (na **sliki 2 K, L, N**), ki pretvori zasuk (deformacijo) preizkušanca v translacijo, ki jo merimo s senzorjem pomika (na **sliki 2, M**).

Induktivni merilec pomika HBM W1EL/0 ima linearno območje 2 mm in z njim lahko merimo največji zasuk  $\Phi=0,05$  rad oziroma  $2,7^\circ$  z resolucijo  $5 \cdot 10^{-6}$  rad. Najmanjši merljivi zasuk je  $3 \cdot 10^{-6}$  rad.

Signal iz merilca pomika je nato voden v ojačevalnik in A/D pretvornik in od tod v računalnik. Komunikacija med merilnimi inštrumenti in računalnikom je izvedena preko IEEE 488 vmesnika. Vodenje meritve in vzdrževanje izotermnih pogojev zagotavlja za to napisani programski paket.

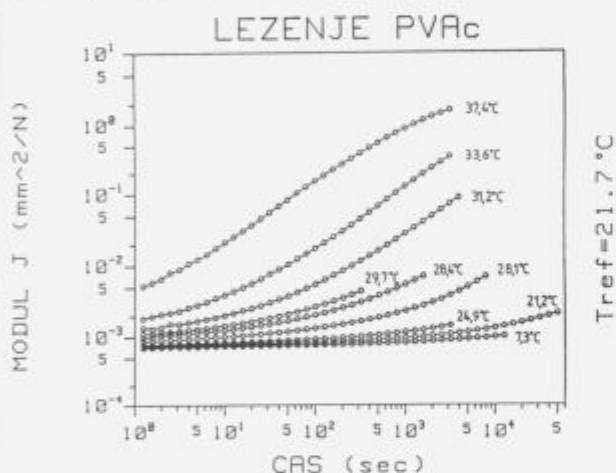
Preliminarne meritve so bile izvedene na preizkušancih iz suhega poli-vinil-acetata (PVAc), premera 9 mm in dolžine 40 mm. Meritve so bile izvedene pri temperaturah od  $7,3$  do  $37,4^\circ\text{C}$  z momenti obremenjevanja od  $0,64$  do  $25$  Nmm. Rezultati izmerjenih funkcij lezenja so predstavljeni na sliki 4. Na sliki 5 pa je predstavljena sumarna krivulja funkcij lezenja iz slike 4, ki jo dobimo s pomočjo časovnotemperaturnega superpozicijskega principa<sup>6</sup>.

#### 4 Sklep

Izdelana je bila merilna naprava za merjenje strižnega modula lezenja in postavljen merilni sistem za izvajanje meritev. Merilni sistem je sestavljen iz treh sklopov in sicer: mehanska naprava, ki omogoča torzijsko obremenjevanje preizkušanca, drugi sklop je termična komora in zadnji je merilna in regulacijska veriga z računalnikom in programsko opremo. Trenje v merilni napravi je minimizirano z vleženjem gibljivih delov v aerostatičnih ležajih. Najmanjši moment obremenitve je  $3,2 \cdot 10^{-5}$  Nm, najmanjši merljivi zasuk je  $5 \cdot 10^{-6}$  rad, območje merjenja je od 0 do  $2,7^\circ$  oziroma  $0,05$  rad. Preizkušanec se nahaja v termični komori, grajeni za temperature od  $-100^\circ\text{C}$  do  $250^\circ\text{C}$  in možnostjo vzdrževanja temperature na  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  v časovnem intervalu  $10^4$  sekund. Izdelana naprava ustreza zahtevam, ki jih postavlja linearna teorija viskoelastičnosti in omogoča rutinsko merjenje strižnega modula lezenja  $J(t)$ .

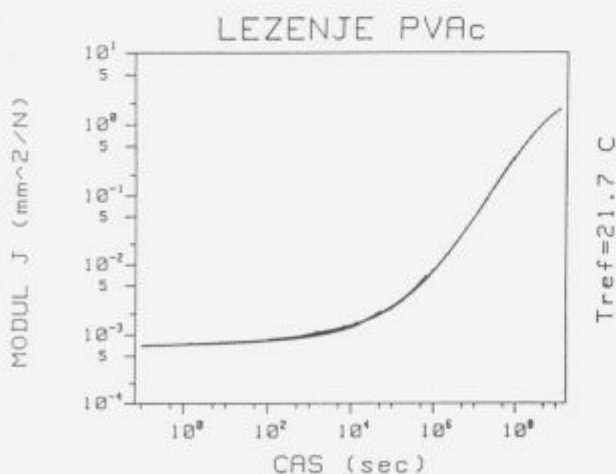
#### 5 Literatura

- 1 N.W. Tschoegl, The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior, SpringerVerlag, Berlin 1989
- 2 G. Link, F.R. Schwarzl, Rheologica Acta, 24, 211-219 (1985)
- 3 D. J. Plazek, J. Polymer Science, Part A-2, 6, 621-626 (1968)
- 4 P. Metlikovič (Magistrska naloga), Analiza procesa lezenja viskoelastičnih materialov pod vplivom strižne obremenitve, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1989
- 5 V. H. Kenner, W. G. Knauss, H. Chai, Experimental Mechanics 22, 75-80 (1982)
- 6 M.L. Williams, R.F. Landel, J.D. Ferry, J. Am. Chem. Soc., 77, 3701-3712 (1955)



Slika 4. Krivulje lezenja pri različnih temperaturah.

Figure 4. Creep curves at different temperatures.



Slika 5. Sumarna krivulja dobljena iz krivulj lezenja prikazanih na sliki 4.

Figure 5. Master curve constructed from creep curves shown in Figure 4.