

# Sočasno merjenje Poissonovega in relaksacijskega modula viskoelastičnih materialov v odvisnosti od časa

## Simultaneous Measuring of the Time Dependent Poisson Ratio and the Relaxation Modulus

T. Skitek<sup>1</sup>, R. Cvelbar, M. Samarin in I. Emri, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-01-22

*Polimerni in kompozitni materiali postajajo vse pomembnejši tudi na inženirskih področjih. Da bi lahko predvideli napetostno-deformacijsko in deformacijsko-napetostno stanje takih materialov, potrebujemo v linearnem viskoelastičnem področju najmanj štiri materialne funkcije. Osnovni materialni funkciji za popis konstitutivnih enačb za napetostno-deformacijsko stanje sta strižni  $G(t)$  in volumski  $K(t)$  modul. Strižni modul relaksacije je relativno lahko izmeriti, medtem ko je merjenje volumskega modula izredno težavno, če že ni nemogoče. Vendar sta ti materialni funkciji povezani z nateznim modulom relaksacije  $E(t)$  in Poissonovim modulom  $\nu(t)$ , ki sta eksperimentalno veliko lažje določljiva, še bolj pomembno pa je to, da lahko oba določimo na enem preizkušancu pri isti meritvi. Tako se nam napake, ki jih naredimo pri ločenih preizkusih, ne seštevajo. Za ta namen je bila razvita posebna naprava, katere delovanje je opisano v tem delu.*

*Ključne besede: Poissonov modul, modul relaksacije, mehanske lastnosti*

*Polymeric and composite materials are gaining importance in different engineering fields. In order to predict stress-strain and strain-stress state of such material, say in linear viscoelastic domain, one needs at least four material functions. For the octahedral form of the constitutive equations for stress-strain state two material functions are shear,  $G(t)$ , and bulk,  $K(t)$ , moduli. It is relatively easy to measure the shear relaxation modulus, however, it is extremely difficult, if not impossible, to determine accurately the bulk modulus. This two material functions are related to relaxation modul in tension,  $E(t)$ , and Poisson ratio,  $\nu(t)$ , which are experimentally much more easily accessible and they can be both determined on one specimen by the same experiment. For that purpose a special apparatus, described in this work, has been developed.*

*Key words: Poisson ratio, relaxation modulus, mechanical properties*

### 1 Uvod

Uporaba polimerov in kompozitov v zadnjih letih močno narašča tudi na konstrukcijskih področjih. V primerjavi s kovinskimi materiali imajo namreč mnogo ugodnejše razmerje med maso in nosilnostjo ter izjemno dobre dušilne lastnosti. Prav ti dve lastnosti sta jim utri pot v vesoljsko, letalsko in avtomobilsko industrijo. Za slednjo je pomembna tudi možnost natančne množične proizvodnje, ki jo omogočata postopka brizganja in ekstruzije. Pomembno prednost pred kovinami imajo ti materiali predvsem pri impulznih obremenitvah. Visoko orientirani polietilen, na primer, absorbira pri impulzni obremenitvi skoraj štiridesetkrat več energije kot najboljšo jeklo.

Za vse konstrukcijske aplikacije je potrebno izdelati analizo napetostno-deformacijskega stanja materiala pri danih robnih pogojih. V okviru veljavnosti linearne teorije viskoelastičnosti potrebujemo v ta namen najmanj štiri materialne funkcije. Dve za primer, ko je obremenitev deformacija, in dve za obremenitev v obliki napetosti. Če uporabimo oktaedrični zapis konstitutivnih enačb, so te materialne funkcije strižni modul  $G(t)$  in volumski modul  $K(t)$  ter strižni modul lezenja  $J(t)$  in

volumski modul lezenja  $B(t)$ . Vse štiri materialne funkcije predstavljajo odziv materiala na enotsko koračno obremenitev. Za  $G(t)$  in  $K(t)$  sta to koračna strižna in volumska deformacija, za  $J(t)$  in  $B(t)$  pa strižno in tlačno napetostno stanje.

Med tem ko je merjenje  $G(t)$  in  $J(t)$  relativno enostavno, je merjenje  $K(t)$  in  $B(t)$  izjemno zahtevno, če ne celo nemogoče. V praksi se zato ponavadi odločimo za merjenje enosnega relaksacijskega modula  $E(t)$  (Youngovega modula) in Poissonovega modula. Če  $E(t)$  in  $\nu(t)$  transformiramo v Laplace-ov prostor, lahko potem izračunamo  $G(t)$  in  $K(t)$ :

$$\bar{G}(s) = \frac{\bar{E}(s)}{2(1+s\bar{\nu}(s))} \quad (1)$$

$$\bar{K}(s) = \frac{\bar{E}(s)}{3(1-2s\bar{\nu}(s))} \quad (2)$$

Tukaj so  $\bar{E}(s)$ ,  $\bar{\nu}(s)$ ,  $\bar{K}(s)$  in  $\bar{G}(s)$  Laplace-ove transformiranke pripadajočih materialnih funkcij v časovnem prostoru. Reševanje enačb (1) in (2) je na žalost numerično nestabilno. Stabilno rešitev dobimo samo pri zelo natančnem poznavanju  $E(t)$  in  $\nu(t)$ . Izkušnje so pokazale, da je to možno samo, če merimo oba modula istočasno<sup>1</sup>.

V prispevku je predstavljena merilna naprava za sočasno merjenje  $E(t)$  in  $\nu(t)$  ter rezultati uvodnih meritev na preizkušancih iz mehkega poliuretana.

<sup>1</sup> Tanja SKITEK, dipl.inž.stroj.  
Fakulteta za strojništvo  
Center za eksperimentalno mehaniko  
1000 Ljubljana, Aškerčeva 6

## 2 Teoretične osnove

Relaksacijski modul  $E(t)$  je definiran kot odziv materiala na obremenitev v obliki enoosne koračne deformacije:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 h(t); h(t < 0) = 0 \text{ in } h(t \geq 0) = 1 \quad (3)$$

$E(t)$  opisuje spremembo enoosne napetosti v odvisnosti od časa:

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = \frac{\frac{F(t)}{a_0 b_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (4)$$

kjer je  $\sigma(t)$  enoosna napetost,  $\varepsilon_0$  velikost koračne relativne deformacije preizkušanca v vzdolžni smeri,  $F(t)$  sila, ki se pojavi zaradi obremenitve v vzdolžni smeri,  $b_0$  debelina preizkušanca,  $a_0$  širina preizkušanca,  $\Delta l$  vzdolžna deformacija in  $l_0$  dolžina neobremenjenega preizkušanca.

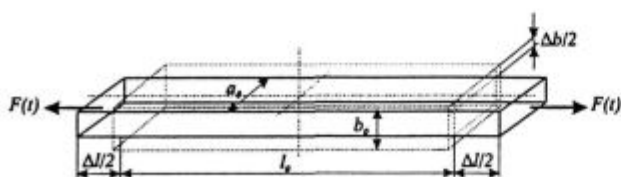
Poissonov modul opisuje spremembo prečne deformacije s časom:

$$\nu(t) = \frac{\varepsilon_2(t)}{\varepsilon_0} = -\frac{\frac{\Delta b(t)}{b_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (5)$$

kjer je  $\varepsilon_2(t)$  prečna relativna deformacija preizkušanca,  $\Delta b(t)$  prečna deformacija in  $b$  debelina preizkušanca. Veličine, predstavljene v enačbah (4) in (5), so prikazane na **sliki 1**.

Deformacija v prečni smeri  $\Delta b(t)$  je praviloma zelo majhna, lahko je celo istega velikostnega reda kot toleranca, s katero je bil preizkušalec izdelan. Iz tega razloga je zelo pomembno, da se lokacija merjenja prečne deformacije med preizkusom ne spreminja. To lahko dosežemo tako, da preizkušalec obremenimo na obeh koncih istočasno. V tem primeru center preizkušanca, teoretično, ne spremeni svoje lokacije. Shematično je to prikazano na **sliki 1**. V primeru, da material ni izotropen in/ali presek ni konstanten, se bo središče preizkušanca seveda premaknilo. Natančnost izdelave preizkušanca je zato izjemno pomembna.

Veličini, ki ju je potrebno spremljati med meritvijo, sta sila  $F(t)$  in prečna deformacija  $\Delta b(t)$ .



Slika 1: Shematski prikaz obojestranskega obremenjevanja preizkušanca

Figure 1: Schematic of the specimen deformed simultaneously from both sides

## 3 Naprava

Naprava, ki zadovoljuje prej omenjene zahteve, je shematsko prikazana na **sliki 2**.

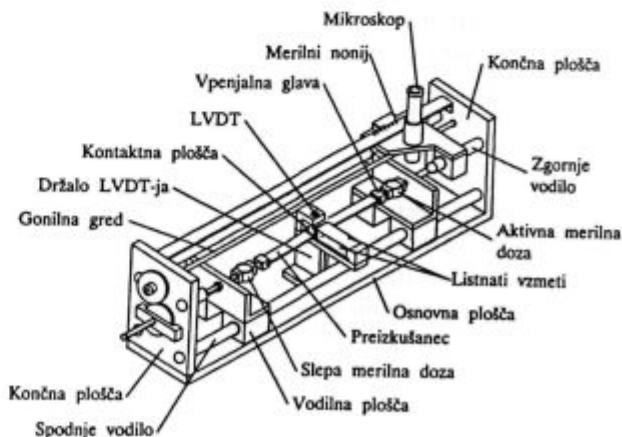
Obremenitev preizkušanca je izvedena z elektromotorjem, ki je napajan z usmernikom (**slika 3**). Elektromotor je preko elastične sklopke pritrjen na gonilno gred. Z zobniki in navojnimi vreteni na obeh končnih ploščah pretvorimo zasuk elektromotorja v enoosno deformacijo preizkušanca. Le-ta je na obeh koncih vpet v vpenjalni glavi, ki sta pritrjeni na dve identični dozi za merjenje sile. Vedno je aktivna ena doza. Velikost deformacije vseh mehanskih delov, ki so pritrjeni na preizkušalec, mora biti enaka, kar zagotovimo s simetrijo vseh mehanskih delov, ki so na obeh koncih pritrjeni na preizkušalec. Velikost konstantne deformacije preizkušanca izmerimo nedotično z mikroskopom in merilnim nonijem, katerega natančnost je  $\pm 0,02$  mm. Prečno deformacijo merimo z induktivnim merilnikom pomikov (LVDT), ki je pritrjen na listnati vzmeti. LVDT ima merilno območje  $\pm 0,625$  mm in natančnost  $\pm 4,4$   $\mu$ m. Z merilno dozo z merilnimi lističi, ki jo imamo sedaj na razpolago, lahko merimo maksimalno silo 60 N, natančnost pa je  $\pm 0,27$  N celotne skale<sup>3</sup>. Sedaj je maksimalna hitrost obremenjevanja 1,5 mm/s. Temperaturna komora in s tem regulacija temperature še ne deluje.

Bolj podroben opis naprave je podan v posebnem poročilu<sup>2</sup>.

## 4 Uvodne meritve

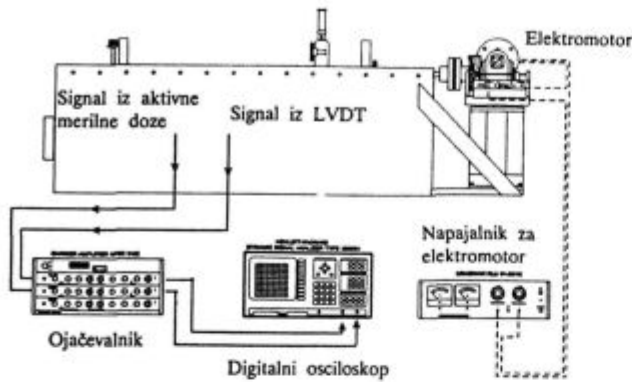
Uvodne meritve so bile izvedene na preizkušancih iz mehkega PU. Napetostna signala iz aktivne merilne doze in LVDT-ja vodimo preko ojačevalnika na digitalni osciloskop (shematski prikaz je na **sliki 3**), kjer signala posnamemo na disketo ter ju z računalniškim programom<sup>3</sup> prevedemo v modul relaksacije  $E(t)$  in Poissonov modul  $\nu(t)$ .

Namen uvodnih meritev je bil spoznati se z napravo ter določiti in analizirati šibke točke v merilni verigi.



Slika 2: Shema merilne naprave

Figure 2: Schematic of the measuring apparatus



Slika 3: Merilna veriga  
Figure 3: Experimental setup

Rezultati ene od meritev so prikazani na **sliki 4**. Meritev je bila izvedena pri sobni temperaturi na mehkem PU. Deformacija v vzdolžni smeri je bila 3,07%.

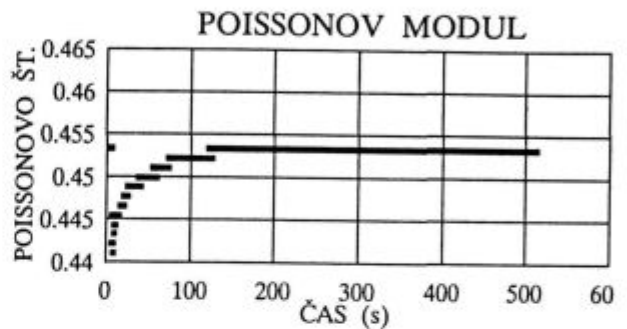
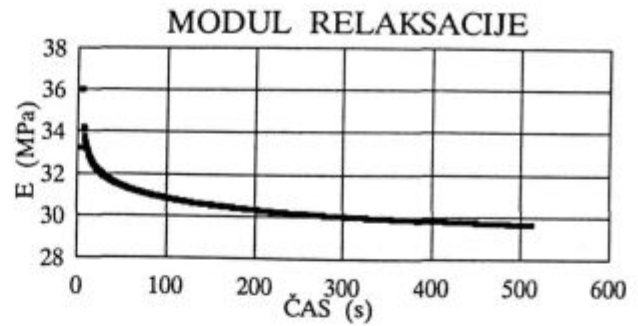
Rezultati meritev modula relaksacije so zadovoljivi. Problemi se pojavijo pri merjenju kontrakcije (prečne deformacije) in s tem pri določanju Poissonovega modula. Pri tem pa imamo dva problema. Prvi je ločljivost digitalnega osciloskopa. Iz drugega diagrama na **sliki 4** je razvidno, da dobimo v vertikalni smeri na intervalu od  $\nu=0,44$  do  $\nu=0,453$  samo 12 diskretnih vrednosti. Tako je v območju spreminjanja Poissonovega modula ločljivost nekaj manj kot 10%. Drugi problem pa je natančnost LVDT-ja. Celotna kontrakcija preizkušanca je pri sobni temperaturi zelo majhna (približno 50  $\mu\text{m}$ ). Natančnost obstoječega LVDT-ja je le 4,4  $\mu\text{m}$ , kar je približno 10% celotne spremembe debeline preizkušanca. Ta natančnost in ločljivost digitalnega osciloskopa tako omogočata meritve z 20% gotovostjo.

Za dobro meritev bi morali imeti senzor z veliko natančnostjo. LVDT nameravamo zamenjati z optično metodo in s tem izboljšati natančnost merjenja prečne deformacije.

## 5 Sklep

Naprava za merjenje modula relaksacije in Poissonovega modula ni optimizirana. Glavne naloge, ki jih je v prihodnosti potrebno narediti na napravi, so:

- postaviti merilni sistem, ki bo omogočal merjenje prečne deformacije z veliko natančnostjo
- konstruirati temperaturno komoro za vzdrževanje konstantne temperature med meritvijo



Slika 4: Rezultati uvodnih meritev  
Figure 4: Results of the preliminary measurement

- povečati hitrost obremenjevanja in
- dokupiti ali konstruirati novo dozo za merjenje sile.

Naprava bo, ko bo optimizirana, omogočala hkratno merjenje Poissonovega modula in modula relaksacije v odvisnosti od časa v temperaturni komori s kontrolirano temperaturo. Rezultati meritev v laboratoriju bodo skupaj z meritvami na drugih napravah uporabljeni za nadaljnje raziskave določevanja mehanskega spektra materialnih funkcij in za nadaljnji razvoj Knauss-Emri-jeve teorije nelinearne viskoelastičnosti.

## 6 Literatura

- <sup>1</sup> N. W. Tschoegl, A research program on the effect of pressure on the mechanical properties of polymers, *Final Report-Part II*, California Institute of Technology, Pasadena, USA, October 1984
- <sup>2</sup> M. Samarin, Analiza obremenitvenega dela, Popis stanja, zagon elektromotorja in smernice za nadaljnje delo, *CEM-SR-95-8*, FS-Ljubljana, Ljubljana, maj 1995
- <sup>3</sup> T. Skitek, Umerjanje senzorjev. Senzor sile in prečne deformacije, *CEM-SR-95-9*, FS-Ljubljana, Ljubljana, junij 1995