

Dušilne lastnosti konstrukcijskih polimerov in kompozitov

Damping Properties of Structural Polymers and Composite Materials

M. Brodar¹, I. Emri, Center za eksperimentalno mehaniko, FS Ljubljana

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

Polimerni in kompozitni materiali imajo nekaj pomembnih prednosti pred kovinskimi. Njihova prednost se pokaže predvsem v primerih, ko je konstrukcijski element ali konstrukcija obremenjena dinamično. Zaradi ugodnejšega razmerja med nosilnostjo in maso materiala imajo konstrukcije, narejene iz polimernih in kompozitnih materialov, višje lastne frekvence. Druga pomembna prednost je njihova izjemna sposobnost disipacije energije. Disipirana energija lahko povzroči dvig temperature materiala, ta pa spremembo njegovih mehanskih lastnosti. Z dvigom temperature se nosilnost materiala zmanjša, dušilne lastnosti pa se največkrat povečajo. Opisane mehanizma zaenkrat ne znamo matematično popisati, zato je vedenje materiala pri neki obremenitvi potrebno preveriti eksperimentalno. V prispevku je predstavljena merilna veriga in metodologija določanja dušilnih lastnosti materiala z metodo histereze. Analizirane so prednosti in omejitve te metode.

Ključne besede: polimeri, viskoelastičnost, dušenje, histereza, faktor dušenja

Polymers and composite materials have some distinct advantages in comparison to traditional metallic materials. This becomes particularly apparent in structural applications that are loaded dynamically. Due to the better strength to mass ratio (in comparison to the metallic materials, including aluminum) structures made out of polymers and polymer based composites have higher natural frequencies. Another important advantage of these materials is the capability to dissipate large amounts of energy through the internal damping. This, however, can cause a significant raise of materials temperature. This furthermore results in the excessive change in material (mechanical) properties. The strength of the material is decreased and the internal damping is usually increased. At the state of present knowledge these phenomena can not be modeled mathematically. It is therefore necessary to be investigated experimentally. In this paper the experimental setup and the methodology for determining materials damping properties, using the hysteresis method, is presented.

Key words: polymers, viscoelasticity, damping, hysteresis, loss factor

1 Uvod

Polimeri in kompoziti na njihovi osnovi so značilni viskoelastični materiali. V primeru, ko polimerne materiale uporabimo za gradnjo konstrukcijskih elementov, moramo dobro poznati njihove mehanske lastnosti, da lahko določimo napetostno-deformacijsko stanje konstrukcijskega elementa oziroma cele konstrukcije. Ena od pomembnih mehanskih lastnosti materiala je faktor dušenja, ki podaja njegovo sposobnost disipiranja energije. V praksi ponavadi govorimo o "notranjem dušenju" materiala. Ta njegova lastnost nas zanima predvsem iz dveh razlogov:

Prvič. V primerih, ko je konstrukcija obremenjena dinamično, se del mehanske energije zaradi notranjega dušenja materiala disipira v obliki toplote. Del te energije, ki je sorazmeren velikosti notranjega dušenja, se iz materiala prenese na okolico, del pa dvigne temperaturo materiala. Zaradi tega dviga se spremenijo, kot je znano, njegove mehanske lastnosti. Porušna trdnost in modul se v ekstremnih primerih lahko zmanjšata tudi za sto tisočkrat. Prav iz tega razloga je potrebno za dinamično obremenjene polimerne materiale poznati odvisnost njihovih mehanskih lastnosti od oblike, velikosti in frekvence

obremenjevanja. Eden od dobrih pokazateljev spreminjanja mehanskih lastnosti zaradi dinamičnih obremenitev je faktor dušenja.

Drugič. Polimerne materiale se pogosto uporablja kot izolacijske elemente v dinamično obremenjenih konstrukcijah. Če naj bo tak dušilni konstrukcijski element optimalen, je potrebno izmeriti njegovo sposobnost dušenja pri različnih režimih obremenjevanja.

Dušilne lastnosti materialov in izdelkov lahko določimo na več načinov. Vse metode spremljajo odziv materiala na dinamične obremenitve. Prvi primer je enkratna vzbuditev z impulzno obremenitvijo, kjer kot odziv spremljamo lastna nihanja preizkušanca. Drug princip določevanja dušilnih lastnosti so merilne metode s prisilnim vzbujanjem, ki so lahko zunaj ali v področju resonance konstrukcijskega elementa ali konstrukcije. Zunaj področja resonance lahko preizkušamo s kontrolirano amplitudo sile ali pa deformacije. Med metode določevanja faktorja dušenja s prisilnim vzbujanjem spada tudi metoda histerezne zanke, ki omogoča spremljanje dušenja v linearnem in nelinearnem področju vedenja materiala. Ta metoda je najbolj univerzalna, zato smo jo tudi v naših raziskavah uporabili za spremljanje dušenja viskoelastičnih materialov v odvisnosti od oblike in velikosti dinamične obremenitve.

Cilj tega prispevka je predstaviti omenjeno metodo histerezne zanke in merilno verigo za določanje faktorja dušenja polimernih in kompozitnih materialov. Pred-

¹ Maksimiljan BRODAR, dipl.inž.stroj.
Fakulteta za strojništvo
Center za eksperimentalno mehaniko
1000 Ljubljana, Aškerčeva 6

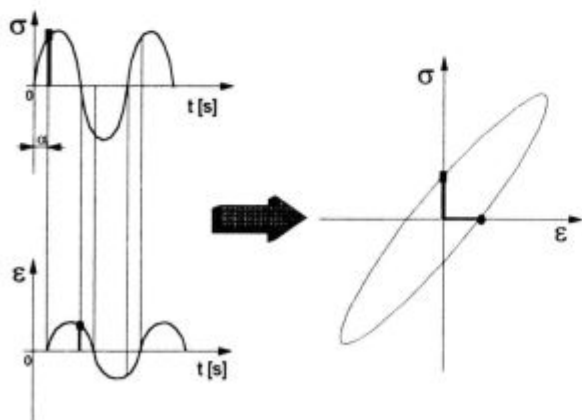
stavljeni so tudi rezultati meritev, s katerimi smo analizirali natančnost in zanesljivost metode pri uporabi razvite merilne verige.

2 Metoda histerezne zanke

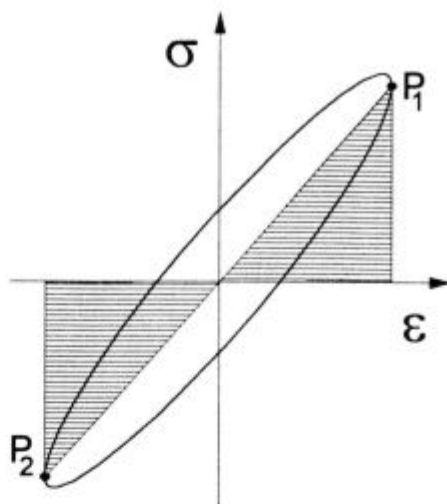
Pri dinamični obremenitvi elastičnega materiala je odziv vedno v fazi z obremenitvijo. Z drugimi besedami, faznega zamika med napetostjo in specifično deformacijo ni. Če z enako obremenitvijo obremenimo viskozno tekočino, bo odziv materiala zamaknjen glede na obremenitev za $\pi/2$. Pri viskoelastičnih materialih (npr. polimerih) je fazni zamik odvisen od vrste viskoelastičnega materiala in frekvenca in je po velikosti, teoretično, v območju med 0 in $\pi/2$.

Meritev kota faznega zamika α daje torej možnost direktnega sklepanja o dušilnih lastnostih materiala. Čim večji je kot faznega zamika α , tem večja je dušilna sposobnost preizkušane materiala. Pri majhnem dušenju je težko meriti fazni zamik in je merilni pogrešek relativno velik. Zaradi tega to metodo izboljšamo tako, da iz napetostnega in deformacijskega signala napravimo histerezno zanko. Ta metoda je edina, ki omogoča zvezno spremljanje dušilnih lastnosti materiala pri katerikoli velikosti obremenitve. Pri harmonični obremenitvi elastičnega materiala se mehanska energija, W_{meh} , shrani v materialu, in ga kasneje ob razbremenitvi zapusti v enaki obliki, torej kot mehanska energija. Pri viskoelastičnih materialih t.i. "shranjeno elastično energijo" sočasno spremlja "disipirana energija", W_{dis} , ki je rezultat notranjega dušenja. Tej disipaciji rečemo tudi histerezna izguba. Disipirana energija (toplota) je skozi cikel obremenitve in razbremenitve povezana s histerezo in podana s ploskovnim integralom zanke, oblikovane v $\sigma(t)$ - $\epsilon(t)$ diagramu. To pomeni, da je disipirani del mehanske energije enak površini, ki jo določa histerezna zanka, prikazana na **sliki 1**.

V področju veljavnosti linearne teorije viskoelastičnosti (LTV) je oblika histerezne zanke elipsa, predstavljena na **sliki 1**. Deformacija in napetost v materialu sta:



Slika 1: Fazni zamik α
Figure 1: Phase shift α



Slika 2: Shranjena mehanska energija v območju LTV
Figure 2: Stored mechanical energy

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

in

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \alpha(\omega)) \quad (2)$$

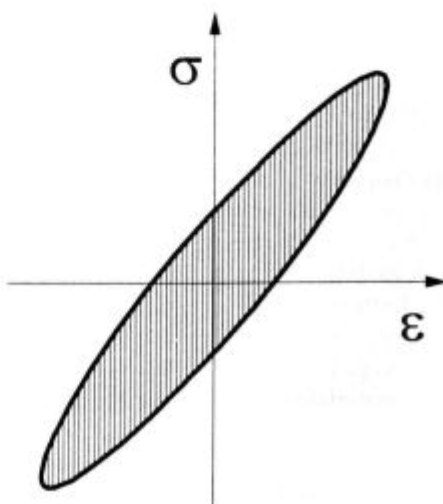
Pri tem je α fazni zamik, ϵ spec. deformacija, σ napetost, ω krožna frekvenca in t čas.

Presečišči središčne premice in elipse, predstavljene na **sliki 2**, podajata meji, znotraj katerih integriramo silo na predpisani poti, da dobimo deformacijsko delo. Pri tem upoštevamo simetričnost elipse:

$$W_s = 2 \int_0^{P_1} \sigma(t) d\epsilon(t). \quad (3)$$

P_1 je zgornje presečišče med središčno premico in elipso.

Površina zanke je enaka specifični izgubljeni (disipirani) energiji oz. toploti. V principu je ta energija enaka



Slika 3: Disipirana mehanska energija v območju LTV
Figure 3: Dissipated mechanical energy

ploskovnemu integralu histerezne zanke, predstavljene na **sliki 3**:

$$W_{dis} = \oint \sigma(t) d\epsilon(t) \quad (4)$$

Enačba (4) je osnovna enačba histerezne pojave. Histerezni pojav razumemo kot čisto izgubo energije, ki se pojavi v celotnem nihaju obremenitve in razbremenitve materiala. Razmerje med disipirano in deformacijsko energijo je definirano kot faktor dušenja:

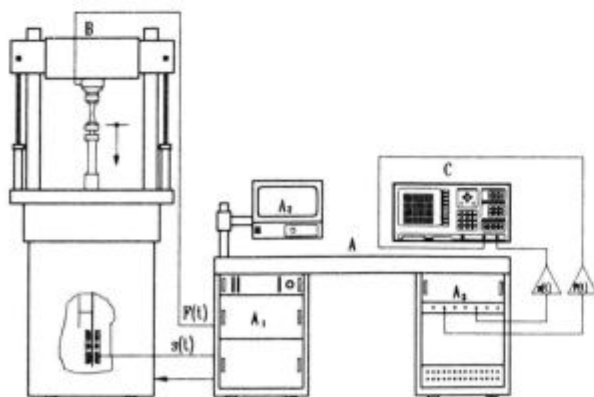
$$\Lambda = W_{dis} / W_s \quad (5)$$

V območju LTV je dušenje lahko določljivo z analitičnimi metodami, če le poznamo amplitude deformacije in sile ter frekvenco obremenjevanja. V praksi je material skoraj vedno obremenjen zunaj področja LTV. To pomeni, da obremenitev začne vplivati na mehanske lastnosti materiala. Tedaj postane vedenje viskoelastičnega materiala nelinearno. Dušilne lastnosti v tem primeru lahko zaenkrat ugotovimo le eksperimentalno z meritvami in numerično integracijo histerezne zanke.

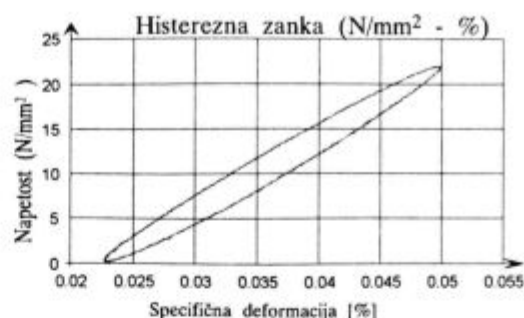
3 Opis merilne verige

Eksperimentalno določanje faktorja dušenja z metodo histereze zahteva merilno napravo, ki omogoča digitalno spremljanje obremenitve in odziva materiala. Znotraj posameznega cikla je potrebno hkrati odčitati ustrezno število diskretnih vrednosti izmerjene napetosti in pripadajoče deformacije enoosno obremenjenega preizkušanca. Iz obeh signalov je nato potrebno sestaviti histerezno zanko in v skladu z enačbami (3), (4) in (5) izračunati faktor dušenja. Merilna veriga, ki smo jo sestavili v našem centru, je shematično prikazana na **sliki 4**. Sestavljajo jo naslednje komponente:

- hidravlično orodje za vpetje vzorca
- računalniško vodena dinamična preizkuševalna naprava SCHENCK VHS 56 HYDROPLUS (hitrost obremenjevanja do 20 m/s, maksimalna sila do 25 kN in maksimalna frekvenca obremenjevanja 300Hz)
- digitalni osciloskop in
- računalnik.



Slika 4: Shematski prikaz merilne verige
Figure 4: Experimental setup



Slika 5: Izmerjena histerezna zanka
Figure 5: Measured hysteresis loop

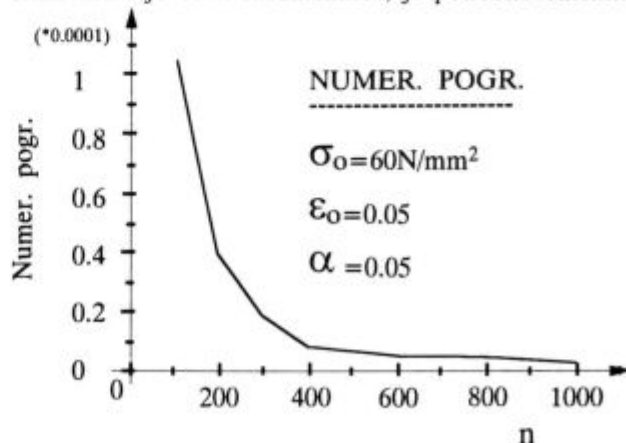
Osrednji element merilne verige predstavlja dinamična preizkuševalna naprava SCHENCK VHS 56, označena z **B**, ki ima vgrajene senzorje in pripadajoče ojačevalnike za merjenje sile in pomika (deformacije). Merilna naprava ima vgrajen lastni procesor (računalnik), ki omogoča "on-line" spremljanje procesa obremenjevanja preizkušanca. Interni računalnik merilne naprave je preko RS232 vmesnika paralelno povezan z "zunanji" računalnikom, (na **sliki 4** ni prikazan) s katerim lahko programiramo internega. Zunanji je poleg tega namenjen spremljanju in analizi izmerjenih vrednosti, ki so najprej shranjene v digitalnem osciloskopu - **C**. Ta je povezan z računalnikom preko vmesnika IEEE488. Oba računalnika delujeta paralelno, kar omogoča izvajanje dinamičnih meritev v praktično poljubnih obremenitvenih razmerah.

Za izvajanje "histereznih meritev" je bil razvit poseben računalniški program⁶.

4 Diskusija in sklep

Razvita merilna veriga omogoča sprotno spremljanje dušilnih lastnosti med samim procesom obremenjevanja preizkušanca. Na **sliki 5** je prikazan primer izmerjene histerezne zanke.

Poleg programerskih problemov, ki so bili povezani s sinhronizacijo obeh računalnikov, je potrebno omeniti



Slika 6: Numerični pogrešek pri izračunu fazne zakasnitve v odvisnosti od števila diskretnih točk
Figure 6: Numerical error in phase shift calculations as a function of the number of discrete points

problem gostote digitalizacije izmerjenih vrednosti. Število diskretnih točk, s katerimi popišemo posamezni izmerjeni signal in s tem histerezo zanko, vpliva na eni strani na natančnost izračuna disipirane energije, na drugi strani pa na frekvenco, s katero spremljamo spreminjanje notranjega dušenja med procesom obremenjevanja. S povečevanjem števila diskretnih točk se povečuje čas, potreben za analizo, kar avtomatično zmanjša frekvenco, s katero lahko spremljamo histerezne zanke, in s tem spreminjanje notranjega dušenja materiala. Na **sliki 6** je prikazana odvisnost numeričnega pogoška pri ovrednotenju faktorja dušenja od števila diskretnih točk, ki popisujejo histerezo zanko. Iz diagrama je razvidno, da je potrebno število diskretnih točk večje od 1000.

Prekomerno povečevanje števila točk postane nesmiselno zaradi omejene natančnosti digitalizacije. Pri osembitnih digitalnih osciloskopih je napaka digitalizacije približno 0,5%.

Predstavljena merilna veriga omogoča spremljanje notranjega dušenja materialov med samim procesom utrujanja. Namenjena je študiju vpliva velikosti in oblike dinamične obremenitve na mehanske lastnosti viskoelastičnih materialov in razvoju matematičnega modela za napovedovanje trajnosti dinamično obremenjenih polimernih materialov. Omogoča tudi rutinske meritve za določanje dušilnih lastnosti materialov.

5 Literatura

- ¹ N. W. Tschoegl, *The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1989
- ² D. Nashif, I. G. Jones, J. P. Henderson, *Vibration damping*, John Wiley & Sons, New York, 1985
- ³ P. Brown, *Handbook of Plastics Test Methods*, Longman Scientific & Technical, 1991
- ⁴ I. Emri, M. Muršič, *Naprava za testiranje izolacijskih lastnosti viskoelastičnih materialov*, zbornik, *Mehanizmi i mašine*, Subotica, 1985
- ⁵ J. J. Aklonis, W. J. MacKnight, *Introduction to Polymer Viscoelasticity*, 2th Edition, John Wiley & Sons, New York, 1983
- ⁶ M. Brodar, *Ugotavljanje dušilnih lastnosti polimerov*, diplomska naloga, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1995