

4. SKLEPI

Od snovskih lastnosti pomembnejše vpliva na porabljenost samo gostota vsebine reaktorja. Ker je moč za pogon mešala brez dodajanja zraka linearno odvisna od gostote, se z njeno spremembo za enak odstotek spremeni tudi moč. Druge veličine na moč pravzaprav ne vplivajo. Več je vplivov spremenjenih vrednosti snovskih lastnosti na prenos toplote. Tu so bili upoštevani Pr število, dinamična oziroma kinematična viskoznost, gostota, toplotna prevodnost in specifična toplota vsebine reaktorja. Razlike vrednosti posameznih naštetih snovskih lastnosti za $\pm 20\%$ pomenijo odstop Nu števila, ki je manjši od $\pm 7\%$. Sprememba vrednosti vseh naštetih snovskih lastnosti (gostote, toplotne prevodnosti in viskoznosti) za $\pm 20\%$ pa pomeni pri moči približno enak odstop, pri prenesenem toplotnem toku pa polovico manj. Največji je odstop zaradi napačne ocene gostote vsebine reaktorja.

UDK 620.1.05:620.1.08:539.434:678.7

Naprava za merjenje lezenja torzijsko obremenjenih polimernih preizkušancev

PETER METLIKOVIČ – IGOR EMRI

1. UVOD

Polimeri so v nekaj desetletjih postali povsem sam po sebi umeven del našega življenja. Čeprav jih uporabljamo večinoma iz gospodarskih razlogov, imajo polimeri tudi precej odličnih lastnosti, zaradi katerih so nezamenljivi. Predvsem so to primeri, ko je potrebna velika elastičnost in majhni moduli (guma) in je pomembna korozijska obstojnost ter razmerje med nosilnostjo in maso (nosilni elementi, lepila, laki). Seznam uporab, v katerih so polimeri nezamenljivi ali imajo prednost pred drugimi materiali, je skoraj neomejen.

Za inženirsko prakso je zelo pomembno poznati mehanske lastnosti materiala, to pomeni poznati zvezo med napetostmi in deformacijami. Polimeri so tipičen viskoelastični material (poleg betona, lesa...), kar pomeni, da togostne, energijske in trdnostne lastnosti niso odvisne le od velikosti deformacije, pač pa tudi od hitrosti deformiranja. Spomnimo se na žvečilni gumi, ki se lepo raztegne, če ga vlečemo počasi, in se pretrga, če ga potegnemo hitro. Ob konstantni napetosti deformacija narašča (ta pojav imenujemo lezenje), torej so mehanske lastnosti odvisne od časa. Ta časovna odvisnost modulov je odvisna od temperature, vlage, okoliškega tlaka in tudi od velikosti deformacije oziroma napetosti [1, 2, 3].

Mehanske lastnosti materialov, kakršne imajo npr. kovine v premočrtnem območju (kjer velja Hookov zakon), določimo s preprostim nateznim preizkusom. Modul elastičnosti in Poissonov koeficient popolnoma označita mehanske lastnosti materiala. Z njima lahko enolično določimo napetostno stanje, ki ga povzroči neka deformacija in nasprotno.

Za natančno označevanje značilnosti viskoelastičnih materialov je treba določiti zvezo med posledico in vzrokom dogodka, npr. povečajoča se deformacija zaradi konstantne napetosti pri lezenju. Poleg lezenja se velikokrat meri tudi relaksacija, kjer je vzrok za dogodek konstantna deformacija in posledica zmanjševana sila. Za določevanje bolj

LITERATURA

- [1] Oprešnik, M., Opara M.: Snaga potrebna za mešanje u industrijskim uredjajima. *Procesna tehnika* (1968) 3, 35/37.
- [2] Oprešnik, M.: Vpliv konstrukcijskih parametrov na prenos toplote v posodah z mešalom. *StrojV* 31 (1985) 11-12, 305/306.
- [3] Oprešnik, M., Opara, M.: Prenos toplote v posodah z mešalom. *StrojV* 33 (1987) 4-6, 49/51.
- [4] Oprešnik, M., Opara, M.: Najmanjša poraba energije pri fermentacijskem postopku. *StrojV* 32 (1986) 10-12, 149/151.
- [5] Nagata, S.: *Mixing. Principles and applications*. Kodanska LTD, Tokyo 1975.
- [6] Henzler, H. J.: *Verfahrenstechnische Auslegungunterlagen für Rührbehälter als Fermenter*. Chem.-Ing.-Tech. 54 (1982) 5, 461/476.
- [7] VDI - Wärmeatlas. 2. Aufl. VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf 1974.
- [8] Gerdenitsch, J., Fingruth, H., Gritzner, G.: Investitionskosten und Wärmeübertragung in Rührwerksbehältern. *Chem.-Ing.-Tech.* 60 (1988) 3, 203/206.

Naslov avtorjev: prof. dr. Miran Oprešnik, dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana
prof. dr. Mirko Opara, dipl. inž.
SMELT, Ljubljana

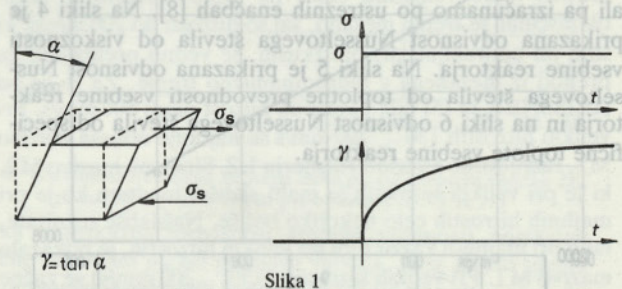
kratkotrajnih odzivov se uporablja dinamičen preizkus, kjer se napetost in deformacija spreminjata sinusno. Poleg lezenja, relaksacije in dinamičnega preizkusa obstajajo tudi drugi preizkusi, ki pa se v praksi redko uporabljajo [1].

Moduli so definirani kot razmerje med posledico in vzrokom. Modul lezenja za strižno obremenitev je definiran tako

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_s} \quad (1),$$

kjer pomenita:

σ_s – konstantno, vsiljeno strižno napetost, $\gamma(t)$ – naraščajoča strižno deformacija. Shematsko je meritev prikazana na sliki 1: v času $t = 0$ izpostavimo preizkušaneč korajčni napetosti in zapisujemo, kako deformacija narašča s časom.



Slika 1

Modul relaksacije za strižno obremenitev je definiran podobno, le da je tu vzrok v času $t = 0$ vsiljena konstantna deformacija, zaradi katere se napetost zmanjšuje: $G(t) = \sigma_s(t)/\gamma$.

Močno je treba poudariti, da si modula nista recipročna, torej $J(t) \neq 1/G(t)$, ker je enkrat vzrok dogodka napetost, drugič pa deformacija. Zveza med njima sicer obstaja, saj sta to lastnosti istega materiala, vendar ni tako zelo preprosta [1].

Če obremenimo preizkušaneč z natezno oziroma tlačno obremenitvijo namesto s strižno, definiramo podobno modul lezenja $D(t) = \epsilon(t)/\sigma_0$, kjer se na vsiljeno konstantno

napetost σ_0 odzove časovno povečajoča se deformacija $\varepsilon(t)$ in modul relaksacije za nateg/tlak $E(t) = \sigma(t)/\varepsilon_0$, kjer se na vsiljeno konstantno deformacijo ε_0 odzove časovno zmanjševana napetost $\sigma(t)$.

Dokler so napetosti in/ali deformacije tako majhne, da so moduli še zanemarljivo odvisni od velikosti napetosti in/ali deformacije, velja linearna teorija viskoelastičnosti. To pomeni, da bo pri polovični napetosti lega krivulje za polovico nižja od deformacije. Po tej teoriji je mogoče računsko določiti odvisnost napetosti za obdobje do preizkušanja deformacije in nasprotno prek konvolucijskih integralov.

Problem določitve meje linearne teorije viskoelastičnosti je dvodelen. Predvsem je to lastnost snovi; nekatere se v primerjavi z drugimi že pri veliko manjših deformacijah oziroma napetostih obnašajo nelinearno. Velja pa, da se pri infinitesimalnih obremenitvah vsi materiali obnašajo linearno viskoelastično [4].

Po drugi strani je to geometrijski problem. Zavedati se moramo, da je zveza med zunanjo silo in napetostjo ($F \Leftrightarrow \sigma$) ter med raztežkom in deformacijo ($\Delta L \Leftrightarrow \varepsilon, \gamma$) odvisna od našega popisa deformacijskega stanja. Hitro se lahko zamislimo ob nesmislu 100-odstotne tlačne deformacije. Pri kovinah je popis deformacijskega stanja po teoriji prvega reda povsem zadovoljiv, ker so deformacije običajno velikostnega razreda do 0,2 %. Pri polimerih so deformacije bistveno večje kakor pri kovinah in kaže, da bo pri polimerih treba upoštevati teorijo velikih deformacij [5]. Ker pri preizkusu vedno merimo makroskopske veličine sile in pomike, je treba pri določevanju meje linearne viskoelastičnosti izločiti vpliv geometrijskega popisa.

Žal je meja linearne viskoelastičnega obnašanja materiala praviloma nizko [6, 2], tako da smo v inženirski praksi praktično vedno v področju nelinearnega viskoelastičnega obnašanja. Želimo si, da bi znali popisati zvezo med napetostnim in deformacijskim tenzorjem v tem področju. Veliko avtorjev je skušalo postaviti konstitucijske enačbe, vendar so vsi medsebojni vplivi (čas, temperatura, vlažnost, velikost deformacije, obdobje do preizkušanja) tako zamotani, da splošne teorije, ki bi vse to zadovoljivo upoštevala, ni [7]. Za zdaj smo zmožni izdelati le izdelek po mojstrskih izkušnjah in izmeriti, kakšne lastnosti ima. Različne teorije dajejo pri oblikovanju napotke po kakovosti.

Med načini postavljanja konstitucijskih enačb prevladujeta dva: statistična mehanika in mehanika kontinuuma [7]. Prvega imenujemo tudi molekularni, ker skuša iz lastnosti in porazdelitev molekul in vezi določiti makroskopske lastnosti materiala. Ta način je bližji kemikom in daje zelo dobre napotke pri sestavljanju zmesi in novih materialov, še posebej tehnologom.

Mehanika kontinuuma praviloma skuša z vpeljavo novih odvisnosti v linearno teorijo viskoelastičnosti dobiti nelinearno teorijo z večjim območjem veljavnosti. Poglavitna zamisel izhaja iz dejstva, da so makroskopske lastnosti snovi odvisne od mikro sprememb v molekularnem svetu. Treba je najti makroskopsko veličino, ki se da dovolj zanesljivo meriti in govori enolično o spremembah na molekularni ravni. Ena takih veličin je prosta prostornina, na kateri temelji Knauss-Emrijeva teorija [6, 2].

Daljnosežni cilj vseh modeliranj je splošna teorija, ki naj bi omogočila določitev materialnih konstant in konstitutivnih enačb, ki bi zanesljivo, stabilno in natančno popisovale napetostno-deformacijsko stanje nelinearnih viskoelastičnih materialov. Ti modeli bi bili uporabni tudi skupaj z metodo končnih elementov.

Ne glede na to, ali samo merimo lastnosti snovi ali pa skušamo z modeli iskati splošne konstitucijske enačbe, vedno potrebujemo čimbolj natančno napravo za merjenje viskoelastičnega odziva snovi na motnjo v obliki napetosti ali deformacije. Tako napravo smo izdelali sami v Laboratoriju za mehaniko.

V nadaljevanju si bomo ogledali problematiko meritev funkcij lezenja in relaksacije, opis merilnih metod in kratek opis naprave za merjenje lezenja vzvojno obremenjenih polimernih preizkušancev, ki smo jo izdelali v Laboratoriju za mehaniko na Fakulteti za strojništvo.

Da se izognemo trenju, so gibljivi deli naprave vodeni v zračnih ležajih. V tem članku predstavlja konstrukcijsko izvedbo, preračun in lastnosti zračnih ležajev, uporabljenih v napravi. Nadrobnejši opis naprave bo objavljen v naslednjem članku z enakim naslovom.

1.1. Problematika meritev funkcij lezenja in relaksacije

Kakor vedno sega praksa na vseh straneh prek meja teorije. Pri večjih deformacijah postaneta lezenje in relaksacija odvisni od velikosti deformacije in izračunana modula nista več samo lastnosti snovi, ampak tudi odvisna od velikosti deformacije. Popis z linearno teorijo ni več mogoč, saj ne velja več Boltzmanovo načelo superpozicije (polovično vzbujanje povzroči polovični odziv [8]).

Meritev terja trenutno spremembo napetosti oziroma deformacije, kar jasno ni izvedljivo. Pri sami merilni tehniki se vsemu temu pridružijo še težave z oblikovanjem in pripravo preizkušancev, kako ustvariti zanje določene pogoje, kako jih vpeti in kako meriti sile oziroma deformacije [1, 8, 9].

Moduli se s temperaturo in časom spreminjajo od steklastega stanja do viskoznega tečenja tudi za faktor 10^{10} . To terja uporabo nekaj različnih eksperimentalnih tehnik za meritve v različnih območjih modulov [10]. Z vsako tehniko pa seveda želimo pokriti čimveč velikostnih razredov modulov. Za to so potrebne izredno natančne naprave z velikimi možnostmi za spremembe eksperimentalnih oken za meritve in kontrolo deformacije, napetosti, temperature in po možnosti še vlage in tlaka.

Teoretične in praktične težave so že pri enoosnih obremenitvah prevelike, zato je medsebojni vpliv napetosti in deformacij pri večosnem deformacijskem stanju še manj raziskan [11]. Meritve pri večosnih obremenitvah so praviloma bolj aplikativne zaradi potreb industrije.

1.1.1. Merilna tehnika

Hitrost lezenja oz. relaksacije se v odvisnosti od časa eksponencialno zmanjšuje, zato rišemo rezultate v diagramu z dvojno logaritemsko mrežo $\log J - \log t$ (t pomeni čas). Merimo tako, da na abscisi pokrijemo čim več dekad časa.

Ker dobimo enako število podatkov na primer od prve do desete sekunde kakor od tisoče do deset tisoče, želimo čimprej meriti. Vendar na začetku naletimo na problem prehodnega pojava. Po definiciji preizkusa lezenja (1) bi morali obremenjevati neskončno hitro, česar v praksi ni mogoče izvesti. Končna hitrost obremenjevanja lahko v neugodnih okoliščinah vpliva na razmeroma velike pogreške na začetku meritve [12].

Različni načini merjenja modulov imajo svoje specifične lastnosti. Merimo lahko lezenje ali relaksacijo pri neki obliki enoosne obremenitve: nategu oz. tlaku ali strigu.

Meritve s tlačno obremenitvijo so zaradi preprostosti zanimive predvsem za testne tehnološke meritve. Preizkušanci morajo biti zaradi uklona kratki glede na premer, zato se pojavi večosno napetostno stanje, običajno združeno z nedefiniranim trenjem na pritisknih ploščah.

Meritve lezenja na nateznih preizkušancih so primerne tudi za zahtevnejše meritve. Glavna težava je pri vpenjanju, saj se v čeljusti pojavi tlak, ki povzroči lezenje materiala iz čeljusti. To lezenje se neposredno prišteje merjenemu in lahko pomeni velik pogrešek. Problem omilimo, če uporabljamo čim daljše preizkušance, kjer dosežemo pa tudi lepše enoosno napetostno stanje. Vendar se s tem poveča vpliv lastne teže, zato se z dolžino ne sme pretiravati [13].

Tudi pri meritvah relaksacije ob nategu imamo podobne težave, ki se jim pridruži še pogrešek zaradi končne togosti obremenjevalnega mehanizma in merilnika sile. Ko se sila zaradi relaksacije zmanjša, se mehanizem razteguje in zato deformacija ni konstantna. Zahteva po bolj togem mehanizmu pa je v nasprotju z zahtevo po majhnem trenju in občutljivem merilniku sile [13].

Pri nateznih preizkusih se že pri teoriji majhnih deformacij pojavi kontrakcija, ki se je praviloma ne upošteva, čeprav je kar precejšnja. Zaradi kontrakcije je dejanska napetost večja od računske, preračunane na neobremenjen prerez [5].

Razmere so precej boljše pri meritvi strižnega modula lezenja. Z vzvojem okroglega preizkušanca lezenje materiala iz čeljusti ne vpliva na zasuk, ki ga merimo, niti lastna teža dolgega preizkušanca. Po teoriji majhnih deformacij se ob vzvoju ne spremeni oblika preizkušanca. V enačbi za polarni odpornostni moment je premer preizkušanca na četrto potenco. To pomeni po eni strani večji pogrešek zaradi nedoločljivosti premera pod neko toleranco, po drugi strani pa omogoča večje spreminjanje vzvojnih togosti preizkušanca z dimenzijami kakor pri nateznem preizkusu. S tem razširimo uporabno območje tenzometra.

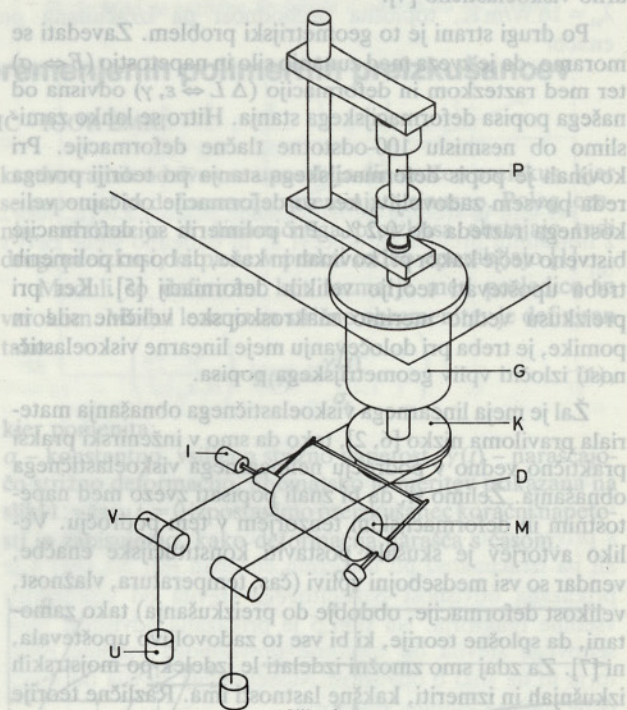
Meritve strižnega modula relaksacije imajo podobne lastnosti, spet z dodatno težavo zaradi kompromisa med togostjo in občutljivostjo mehanizma in merilnika sile.

Sklenemo lahko, da ima med merilnimi metodami prednost meritve strižnega modula lezenja, ker je najnatančnejša. Tudi drugi avtorji za natančne meritve uporabljajo to metodo [10, 14, 15, 16, 17]. Posebna prednost tovrstne naprave je izredno velik razpon možnosti za merjenje modulov: od steklastega stanja materiala pa prav do viskoziometrije z uporabo plošč.

1.1.2. Naprava za merjenje lezenja torzijsko obremenjenih polimernih preizkušancev

Napravo smo izdelali v Laboratoriju za mehaniko na Fakulteti za strojništvo. Iz prej navedenih razlogov smo se odločili za merjenje torzijskega lezenja. Glavni problem je bil, kako zmanjšati trenje v mehanizmu. Avtorji podobnih naprav uporabljajo različne izvedbe uležajen: ali na zračni blazini [14, 16, 17] ali v magnetnem polju [15, 10]. Odločili smo se za prvega zaradi preprostosti izdelave in uporabe. Podoben torziometer [14] lahko obremenjuje preizkušance z momenti $3 \cdot 10^{-5}$ Nm in meri kotne zasuke 10^{-5} rad, kar smo dosegli tudi mi.

Shema merilne naprave je prikazana na sliki 2. Preizkušanec P je na zgornji strani vpet v fiksno čeljust. Na spodnji strani je s čeljustjo pritrjen na gred glavnega ležaja G, prek katere preizkušanec obremenimo s konstantnim momentom. Preizkušanec torzijsko leze in merimo časovno odvisnost povečajočega se kotnega zasuka.



Slika 2

Moment dobimo z utežmi U, ki prek vrvice, speljane čez ležaja V suka kolo K na gredi glavnega ležaja. Zasuk gredi glavnega ležaja merimo z induktivnim merilnikom pomika I na merilnem ležaju M, ki je osno pomikčen. Drog D se naslanja na merilno kolo na gredi glavnega ležaja in, ko se leta zasuka, se zaradi trenja drog D in z njim merilnik pomika premočrtno premikata.

(Nadaljevanje prihodnjič)

Naslova avtorjev: Peter Metlikovič, dipl. inž.
Sava Kranj in
prof. dr. Igor Emri, dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo,
Ljubljana