

UDK 620.1.05:620.1.08:539.434:678.7

# Naprava za merjenje lezenja torzijsko obremenjenih polimernih preizkušancev

PETER METLIKOVIČ - IGOR EMRI

II. del\*

## 1. UVOD

Polimeri se zaradi nekaterih lastnosti vedno bolj uporabljajo kot konstrukcijski material, vendar se mehanske lastnosti s časom, temperaturo, vlažnostjo in velikostjo tako močno spreminjajo, da je analitična obravnava konstrukcij izredno težavna. Današnje stanje je takšno, da po eni strani ne znamo dovolj natančno določiti lastnosti materiala, po drugi strani pa ni primerne teorije, po kateri bi iz znanih lastnosti pri preprosti obremenitvi ugotovili obnašanje izdelka iz polimera v praksi [1].

Za natančno označevanje značilnosti termo-viskoelastičnih polimerov je treba, med drugim, poznati krivulje lezenja pri različnih temperaturah in drugih pogojih. Preizkus lezenja pri strižni obremenitvi je definiran tako: preizkušaneč v trenutku (temu se da v praksi le približati) obremenimo, da dosežemo konstantno strižno napetost  $\sigma_s$  in merimo, kako deformacija  $\gamma(t)$  s časom narašča. Funkcija modula lezenja za strižno obremenitev je definirana kot kvocient deformacije in napetosti [2]:

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

Meritve lezenja so osnova za postavljanje konstitucijskih enačb, ki popisujejo obnašanje polimerov v odvisnosti od obdobja temperature, obdobja do preizkuševanja obremenjevanja ter drugih pogojev [1], [3], [4].

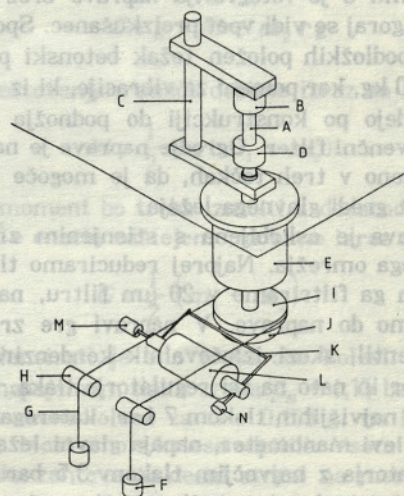
Za meritve lezenja je bilo izdelanih že veliko naprav. Ker je treba meriti zelo majhne sile in deformacije in ker se moduli s temperaturo spreminjajo tudi za faktor  $10^4$  [10], je eden pglavitnih problemov, kako zmanjšati trenje v merilnem mehanizmu [3]. Avtorji podobnih naprav so uporabljali zračne ležaje [2], [7], [8] ali magnetne ležaje [9], [10]. Gibljivi deli naprave za merjenje lezenja torzijsko obremenjenih polimernih preizkušancev, ki smo jo izdelali v Laboratoriju za mehaniko na Fakulteti za strojništvo, so vležajeni v zračnih ležajih.

Teoretične osnove in praktične težave merjenja funkcije modula lezenja ter konstrukcijsko izvedbo, preračun in lastnosti zračnih ležajev, uporabljenih v napravi, smo predstavili v prvem delu [2], zato smo tukaj ponovili le najosnovnejše pojme, v nadaljevanju pa sledijo opis izdelane naprave in rezultati poizkusne meritve.

## 2. OPIS NAPRAVE

Osnovna zamisel natančne naprave za merjenje lezenja torzijsko obremenjenih preizkušancev je, da se gibljivi deli ne dotikajo ničesar drugega kakor preizkušanca. Zato mora gred, prek katere obremenjujemo preizkušaneč in katere zasuk merimo, lebdeti v magnetnem polju [9], [10], ali na zračni blazini [6], [7], [8]. Moment se lahko ustvari z indukcijo [9], [10] ali s kolesom, vrstico in utežema [6], [7], [8]. Zasuk se lahko meri z ogledalcem in svetlobnim žarkom [9], [10], z induktivnim merilnikom kota zasuka [6], [7] ali s spremembo vrtenja v premo gibanje in merjenjem le-tega z induktivnim merilnikom pomika [8]. Odločili smo se za najpreprostejšo različico uležajenja v zračnih ležajih, obremenjevanja z utežjo in merjenjem zasuka s spreminjanjem vrtenja v premo gibanje, podobno kakor pri Kennerjevem aparatu [8].

Shema merilne naprave in fotografija izdelane naprave sta na slikah 1 in 2. Preizkušaneč A valjaste oblike je vpet na zgornji strani v nepremično čeljust B, ki jo je mogoče premikati po vodilu C, da lahko vpne preizkušaneč različnih dolžin. Na spodnji strani je preizkušaneč vpet v aktivno čeljust D, ki je pritrjena na gred glavnega ležaja E, prek katere preizkušaneč obremenimo s konstantnim momentom.

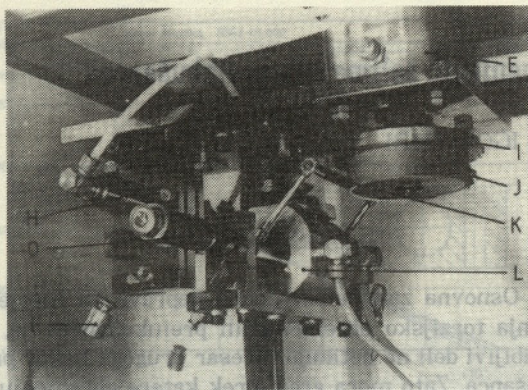


Sl. 1. Shema merilne naprave.

A - preizkušaneč. B - zgornja čeljust. C - vodilo.  
D - spodnja čeljust. E - glavni ležaj. F - utež. G - merilna vrstica. H - ležaj merilne vrstice. I - obremenilno kolo.  
J - torzno kolo. K - torni drog. L - merilni ležaj.  
M - induktivni merilnik pomika.  
N - protiutež

\* I. del je bil objavljen v SV (35) 1989/4-6, str. 56-57 in SV (35) 1989/7-8, str. 102-108.





Sl. 2. Merilna naprava.

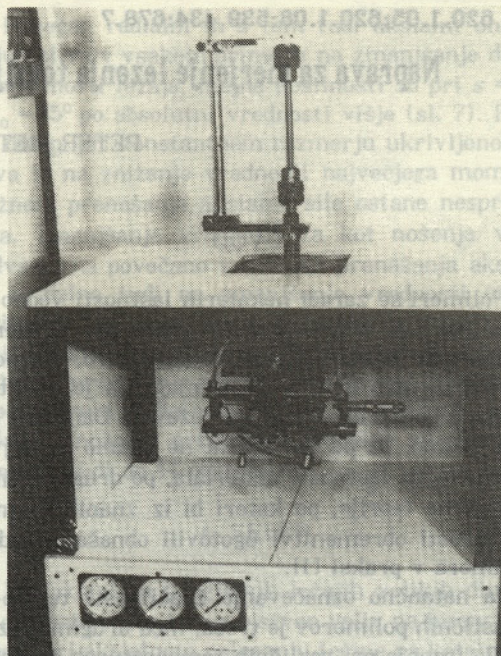
O – mikrometrski vijak. Pomen drugih označb kakor na sliki 1.

Moment vzpostavimo z utežema F, ki – prek merilne vrvice G, vodene čez ležaj merilne vrvice H – sukata obremenilno kolo I. Z razliko mas uteži F dosežemo različno velike momente, z ničnim vred, v obe smeri. Obremenjujemo za zdaj z ročnim obešanjem uteži.

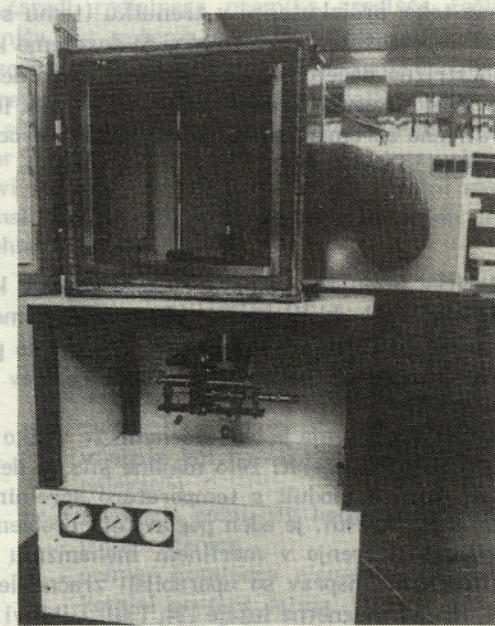
Zaradi obremenitve preizkušane torzijsko leze. Zasuk glavne gredi se prek tornega kolesa J in tornega droga K pretvori v osni pomik gredi merilnega ležaja L, ki nosi jedro induktivnega merilnika pomika M. Za zanesljiv stik med kolesom in drogom je potrebna normalna sila, ki jo je mogoče nastaviti s protiutežjo N. Ta sila ne sme biti premajhna, ker mora sila trenja pri obremenjevanju sistema pospešiti maso osi in droga. Za ročno premikanje osi merilnega ležaja in za umerjanje merilnika pomika rabi mikrometrski vijak O (sl. 2).

Na sliki 3 je fotografija naprave brez toplotne komore. Zgoraj se vidi vpet preizkušanelec. Spodaj je na gumenih podložkih položen težak betonski podstavek z maso 300 kg, kar pomeni za vibracije, ki iz različnih virov pridejo po konstrukciji do podnožja naprave, viskorefekvenčni filter. Ogrodje naprave je na podstavku pritrjeno v treh točkah, da je mogoče nastaviti navpičnost gredi glavnega ležaja.

Naprava je oskrbljena s stisnjenim zrakom iz fakultetnega omrežja. Najprej reduciramo tlak zraka na 4 bar in ga filtriramo v 20  $\mu\text{m}$  filtru, nato ga po cevi vodimo do naprave. V napravi gre zrak skozi vstopni ventil, skozi izločevalnik kondenzirane vode 5  $\mu\text{m}$  filter in nato na tri regulatorje tlaka. Prvi regulator, z najvišjim tlakom 7 bar, katerega izstopni tlak kaže levi manometer, napaja glavni ležaj. Druga dva regulatorja z največjim tlakom 3,5 bar napajata merilni ležaj in ležaja merilne vrvice, njuna manometra imata končno območje 4 bar. Običajne nastavitve tlakov so: za glavni ležaj 1 bar nadtlaka, za merilni ležaj 0,4 bar in za ležaja merilne vrvice 0,15 bar. Ti tlaki zadoščajo za obremenitve na vrvi do 1 N. Za večje obremenitve je treba tlak ležajev merilne vrvice sorazmerno zvišati, pri velikih obremenitvah pa tudi napajalni tlak glavnega ležaja.



Sl. 3. Merilna naprava brez toplotne komore.



Sl. 4. Merilna naprava s toplotno komoro.

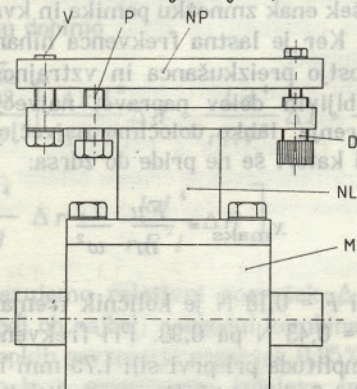
Za to napravo smo izdelali tudi toplotno komoro, grajeno za temperature od  $-100$  do  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kompletna naprava z nameščeno komoro je na sliki 4. Komora je dvodelna: v eni enoti so ventilator, grelo in prostor za hladilni element, v drugi, ki je nameščena na samem torziometru, pa je preizkušanelec. Enoti sta povezani z gibljivimi, dobro izoliranimi cevmi s premerom 120 mm, po katerih se zrak krožno pretaka. S tako konstrukcijo smo sicer povečali stroške in toplotne izgube, vendar dobimo primernejši tok zraka v komori in se izognemo vibracijam, ki bi jih povzročal dovolj močan ventilator.



## 3. UMERITEV NAPRAVE

Gred glavnega ležaja mora stati navpično, kar smo dosegli z nastavitvijo vijakov, na katerih stoji ogrodje celotne naprave.

Gred merilnega ležaja mora ležati natančno vodoravno, sicer nastala komponenta teže povzroča dodaten moment na preizkušane. Pritrditev merilnega ležaja na nosilno ploščo prikazuje slika 5. Merilni ležaj je privijačen na nosilec; njegov nagib se da zelo fino uravnavati. Na nosilno ploščo je pritrjen s štirimi vijaki, od katerih podporna vijaka nosilec odmikata, druga dva pa vlečeta. Z levimi vijaki (sl. 5) nastavimo razdaljo in nagib, ki ga nato fino uravnamo z diferencialnim vijakom na desni. Razlika korakov navojev v diferencialnem vijaku je 0,05 mm.



Sl. 5. Pritrditev merilnega ležaja na nosilno ploščo.

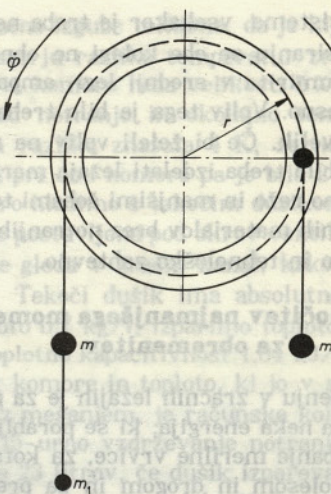
V – vlečni vijak. P – podporni vijak. NP – nosilna plošča. D – diferencialni vijak. NL – nosilec ležaja. M – merilni ležaj.

Tudi nastavitve vodoravnosti gredi ležajev merilne vrvice je zelo pomembna, saj kolesi nista osno vodeni in ju v srednji legi drži le sila v vrvi. Tudi tu se vodoravnost nastavlja z diferencialnima vijakoma, za vsako kolo posebej.

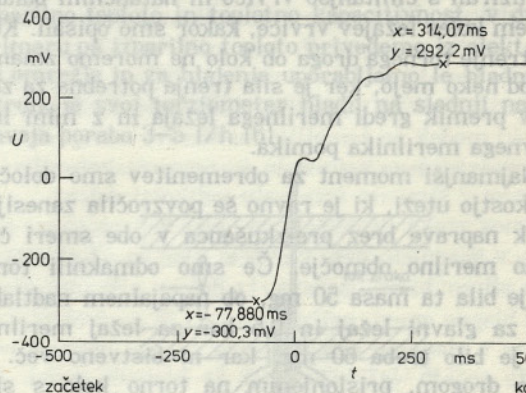
Pri umerjanju celotnega mehanizma smo opazili neponovljivost rezultatov. Ugotovili smo, da to izvira predvsem iz lastnosti ležajev merilne vrvice. Mešata se dva vpliva: statična nezbalansiranost kolesa, označili smo jo z odvečno maso  $G$  na sliki 6, in moment na kolo  $M$ , ki se pojavi zaradi toka zraka in geometrijskih nepravilnosti v ležaju. Obe kolesi je bilo treba zbalansirati. Ker sta oba vpliva povezana, je treba določiti dve mejni stanji, ko se njuna učinka enkrat odštejata, drugič seštevata. To smo določili z uporabo vrvice in dveh uteži mase  $m$ . Če poiščemo najmanjšo dodatno maso  $m_1$ , ki zavrti kolo v smeri  $\phi$  iz vsake lege, se to zgodi takrat, ko je odvečna masa  $G$  na nasprotni strani od prijemališča uteži  $m_1$ , kakor je narisano na sliki 6. Gravitacijo smo označili z  $g$ . Velja enakost:

$$Grg + M = m_1 rg \quad (2).$$

Če poiščemo najmanjšo maso  $m_2$ , ki zavrti kolo v smer  $\phi$  samo iz ene lege, se to zgodi takrat, ko je masa  $g$  na strani prijemališča vrvice, in velja:



Sl. 6. Balansiranje kolesa ležaja merilne vrvice.



Sl. 7. Značilnica prehodnega pojava pri izvedbi preizkusa.

$$-Grg + M = m_2 rg \quad (3).$$

S seštevanjem enačb dobimo izraz za  $M$ :

$$M = \frac{1}{2} rg(m_1 + m_2) \quad (4).$$

Ta moment bo treba izničiti z dodatno utežjo na vrvi. Če enačbi odštejemo, dobimo izraz za  $G$ :

$$G = \frac{1}{2} (m_1 - m_2) \quad (5).$$

Zbalansirati je bilo treba obe kolesi. Pri absolutnem napajalnem tlaku zraka  $p_s = 1,15$  bar smo dobili na desnem kolesu za  $G = 0,153$  g, na levem  $G = 0,147$  g. Masi smo s kolesa odpilili. Vsota momentov toka zraka zahteva na desni strani na merilni vrvi utež mase  $m = 0,086$  g, gledano na napravo s prve strani. Ta napajalni tlak zraka bo zadoščal za obremenitve do 1 N na vrvi. Ob večjih obremenitvah bo treba napajalni tlak zvišati in se bo moment toka zraka na kolo ležaja spremenil, vendar je ta sprememba majhna in pri tako veliki sili zanemarljiva.

Po velikosti navedenih balansirnih mas lahko že sklepamo, kako velika utež je potrebna za zanesljivo



premaknitev sistema, vsekakor je treba nekaj 10 mg. Tudi po balansiranju se obe kolesi ne obnašata lepo, saj se neradi umirita v srednji legi, ampak poplesavata levo – desno. Vpliv tega je bilo treba preveriti, za zdaj ni prevelik. Če bi želeli vpliv na meritev še zmanjšati, bi bilo treba izdelati ležaja merilne vrvice z manjšo zračno režo in manjšimi šobami ter s finejšo obdelavo statanih materialov brez notranjih napetosti, kar pa je drago in tehnološko zahtevno.

### 3.1 Določitev najmanjšega momenta za obremenitev

Kljub vodenju v zračnih ležajih je za premik sistema potrebna neka energija, ki se porablja za nasedanje in upogibanje merilne vrvice, za kotalno trenje med tornim kolesom in drogom in za premagovanje preostale nezbalansiraniosti ležajev. Vse te učinke smo minimizirali s čimtanjšo vrvico in natančnim balansiranjem koles ležajev vrvice, kakor smo opisali. Kotalno trenje tornega droga ob kolo ne moremo zmanjšati pod neko mejo, ker je sila trenja potrebna za zanesljiv premik gredi merilnega ležaja in z njim induktivnega merilnika pomika.

Najmanjši moment za obremenitev smo določili z velikostjo uteži, ki je ravno še povzročila zanesljiv premik naprave brez preizkušanca v obe smeri čez celotno merilno območje. Če smo odmaknili torni drog, je bila ta masa 50 mg, ob napajalnem nadtlaku 3 bar za glavni ležaj in 0,5 bar za ležaj merilnih vrvic je bilo treba 60 mg, kar ni bistveno več. S tornim drogom, prislonežnim na torni kolo s silo 0,18 N ob normalnih napajalnih tlakih ležajev (glej 2. poglavje), je bila potrebna masa 65 mg. Če upoštevamo, da je polmer kolesa za obremenjevanje 51 mm, dobimo, da je najmanjši moment za obremenjevanje enak  $3,2 \cdot 10^{-6}$  Nm. Merili smo z izredno tanko sintetično nitko, primerno le za uteži z maso do 200 g, torej za meritve ob najmanjših momentih. Za uteži z maso do 2,5 kg smo uporabili ribiško vrvico s premerom 0,15 mm. Masa, potrebna za premaknitev sistema ni bistveno večja: 60 mg za dvignjen torni drog in 75 mg za celotni sistem.

Če hočemo spremljati hitrejše dogodke, moramo silo med drogom in kolesom povečati na 0,43 N z odstranitvijo protiuteži (sl. 1). S tem se poveča tudi kotalno trenje in je za premik sistema potrebna utež z maso 90 mg in je najmanjši moment za obremenjevanje v tem primeru  $4,4 \cdot 10^{-5}$  Nm.

### 3.2 Meritev zasuka

Polmer z gumo obloženega tornega kolesa je  $42,59 \pm 0,05$  mm. Induktivni merilnik pomika HBM WIEL/0 ima linearno območje 2 mm, torej lahko merimo največji zasuk  $0,05$  rad oziroma  $2,7^\circ$ . Na kalibracijskem listu merilnika je označen razred 0,04 ob občutljivosti  $\pm 80$  mV pri pomiku  $\pm 1$  mm (iz ojačevalnika dobimo ob tem napetost  $\pm 10$  V). To pomeni,

da lahko merimo absolutne pomike v intervalu negotovosti  $8 \cdot 10^{-4}$  mm, kar je enako kotu  $2 \cdot 10^{-5}$  rad. Sama ponovljivost merilnika je še boljša,  $2 \cdot 10^{-4}$  mm, kar ustreza kotu  $5 \cdot 10^{-6}$  rad.

Vsi ti podatki seveda veljajo, dokler torni drog ne zdrsne ob tornem kolesu. Sila trenja  $F_{tr}$  je enaka normalni sili med drogom in kolesom  $F$ , pomnoženi s količnikom trenja  $\mu$ . Med gibanjem sistema mora biti sila trenja v vsakem trenutku večja od vztrajnosti gredi merilnega ležaja in tornega droga mase  $m = 0,6$  kg. Največji pospešek je enak:

$$a_{maks} = \frac{F_{tr}}{m} \quad (6).$$

Ob nihanju s frekvenco  $\omega$  in pomikom  $x$  je največji pospešek enak zmnožku pomika in kvadrata kotne hitrosti. Ker je lastna frekvenca nihanja  $\omega$  določena s togostjo preizkušanca in vztrajnostnim momentom gibljivih delov naprave, največji pospešek pa s silo trenja, lahko določimo največjo amplitudo nihanja, pri kateri še ne pride do zdrsa:

$$x_{maks} = \frac{F\mu}{m} \frac{1}{\omega^2} \quad (7).$$

Pri sili  $F = 0,18$  N je količnik trenja enak 0,92, pri sili  $F = 0,43$  N pa 0,98. Pri frekvenci 2 nihanja je mejna amplituda pri prvi sili 1,75 mm in pri drugi 4,45 mm. Pri frekvenci 5 Hz se amplitudi znižata na 0,28 mm oziroma 0,72 mm, pri 10 Hz na 0,07 mm in 0,18 mm, pri 20 Hz na 0,018 mm in 0,045 mm in pri 50 Hz na 0,0028 mm in 0,0071 mm. Vsako večje nihanje ob dani frekvenci povzroči zdrs in s tem dobimo neuporabne izmerke. Na to je treba pri izvedbi obremenjevanja preizkušanca zelo paziti.

Značilnica prehodnega pojava pri izvedbi preizkusa je prikazana na sliki 7. Merjen je pomik v odvisnosti od časa, interval med križcema je 0,4 sekunde.

### 3.3 Izračun modula in analiza geometrijskih pogreškov

Za torzijski preizkušanec z dolžino  $l$  s polarnim vztrajnostnim momentom prereza  $\rho_p$  se modul lezenja izračuna po enačbi:

$$J(t) = \frac{l}{T} \frac{1}{\varphi(t)} \quad (8),$$

kjer sta  $T$  torzijski moment in  $\varphi(t)$  kot zasuka. Če označimo napetost ojačanega signala merilnika pomika z  $u(t)$ , s  $k = 1 \text{ mm/V} \pm 0,04\%$  konstanto ojačanja in polmer tornega kolesa z  $r = 42,59 \pm 0,05$  mm, velja:

$$\varphi(t) = \frac{k u(t)}{r} \quad (9).$$

Torzijski moment je enak zmnožku mase uteži  $G$ , gravitacije  $g$  in polmera obremenilnega kolesa  $R = 50,96 \pm 0,05$  mm.



Za okrogli prerez premera  $d$  je polarni vztrajnostni moment enak:

$$I_p = \frac{\pi}{32} d^4 \quad (10).$$

Po združitvi izrazov dobimo:

$$J(t) = \frac{\pi}{Gg} \frac{kd^4}{rRI} \quad (11).$$

Ker poznamo odstopke vrednosti posameznih parametrov, lahko izračunamo celotno razliko:

$$\Delta J = \frac{\partial J}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial J}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial J}{\partial k} \Delta k + \frac{\partial J}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial J}{\partial R} \Delta R \quad (12),$$

po odvajanju dobimo

$$\Delta J = \frac{\pi}{Gg} \left[ \frac{4kd^3}{rRI} \Delta d + \frac{kd^4}{rRI^2} \Delta l + \frac{d^4}{rRI} \Delta k + \frac{kd^4}{r^2RI} \Delta r + \frac{kd^4}{rR^2I} \Delta R \right] \quad (13).$$

Če opazujemo relativni pogrešek  $\Delta J/J$ , zadnji trije sumandi ob najbolj neugodni kombinaciji in največjih odstopkih povzročijo pogrešek 0,25%. Zmanjšali bi ga lahko le z natančnejšo izdelavo in določitvijo polmerov tornega in obremenilnega kolesa, s tanjšo merilno vrstico in z natančnejšo kalibracijo merilnika pomika.

Izredno pomembna je natančna določitev dimenzij preizkušanca, še zlasti premera. Če je premer preizkušanca npr.:  $d = 5$  mm in je določen z odstopkom  $\pm 0,01$  mm, je celotni pogrešek že 1,1%, pri odstopku  $\pm 0,05$  mm se pogrešek poveča na 4,3% in pri odstopku  $\pm 0,1$  mm na kar 8,3%. Tudi dolžino preizkušanca je treba čimbolj natančno določiti, čeprav vpliv odstopka dolžine še zdaleč ni tako pomemben kakor pri premeru. Če je isti preizkušanelec z dolžino  $l = 30 \pm 0,1$  mm, se napaka poveča ob zadnjem primeru na 8,6%.

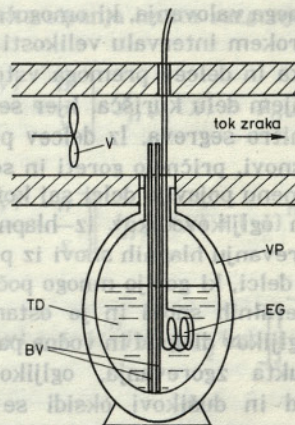
Kljub temu, da so te vrednosti izračunane ob najbolj neugodni kombinaciji največjih odstopkov, so kar velike. Posebno premere preizkušancev bo treba določati z največjo mogočo natančnostjo.

### 3.4 Toplotna komora

Na sliki 4 je prikazana naprava z nameščeno toplotno komoro. Prevodnost celotnega sistema je 6 W/K. Za gretje uporabljamo dva grelca z močjo 600 W, ki ju napajamo prek regulatorja lastne izdelave. Temperaturo merimo s termočlenom Ni-CrNi s preizkušancem v komori. Hladna točka je mešanica ledu in vode v dobro izolirani posodi, led smo potopili na dno z žično mrežico. Regulator zagotavlja večurno stabilnost temperature znotraj 0,5 K v merilni točki.

Žal so toplotne izgube tolikšne, da je kljub zmogljivemu ventilatorju razlika temperatur zraka na vstopu in izstopu iz komore reda velikosti 5% temperaturne razlike med notranjo in okolišno temperaturo. Pri 90 °C je ta razlika znašala 4 K, razlika temperatur na vrhu in pri dnu komore pa je bila 2 K.

Komoro hladimo s tekočim dušikom. Posoda s 25 litri LN<sub>2</sub> je postavljena pod okrov ventilatorja, tako da vrat posode gleda v zračni kanal, kakor je prikazano na sliki 8. Tekoči dušik ima absolutno temperaturo 77 K, gostoto 0,7 kg/l, izparilno toploto 197 kJ/kg in plin ima toplotno kapacitivnost 1,04 kJ/kgK. Glede na prevodnost komore in toploto, ki jo v sistem prinaša ventilator z mešanjem, je računski količina LN<sub>2</sub>, potrebna za 15-urno vzdrževanje notranje temperature 6 °C, enaka 23 litrov, če dušik izpareva v sistemu in 44 l, če ga izparevamo z električnim grelom. Razlika je v tem, da enkrat porabljamo za hlajenje sistema izparilno toploto in toplotno kapacitivnost, v drugem primeru pa izparilno toploto privedemo iz električnega omrežja in za hlajenje uporabljamo le hladni plin. Struik je svoj torziometer hladil na slednji način in navaja porabo 3–5 l/h [6].



Sl. 8. Hlajenje komore s tekočim dušikom.

V – ventilator. VP – vakuumsko posoda. TD – tekoči dušik. EG – električno grelo. BV – bakreni vodnik.

Ker je dotakanje tekočega dušika v sistem tehnološko zahtevno, smo se odločili ubrati srednjo pot in smo nekaj izparilne toplote dovedli z uporabo bakrenih vodnikov, preostali del dušika pa izparili z električnim grelom (sl. 7). S petnajstimi vodniki s prerezi 16 mm<sup>2</sup>, dolžinami 600 mm se sistem ohladi na 18,5 °C s siceršnjih 28 °C, kolikor jih ob sobni temperaturi 22 °C doseže v stacionarnem stanju zaradi ventilatorja. Električnemu cevnemu grelu z upornostjo 22,5 Ω lahko kontroliramo moč z nastavitvijo napetosti. Ob napajanju s 50 V je temperatura sistema padla na 0 °C, ob napajanju s 40 V pa na 5 °C. S polno posodo dušika smo vzdrževali 7,5 h temperaturo v sistemu na 5 °C.

(Nadaljevanje prihodnjič)

Naslova avtorjev: Peter Metlikovič, dipl. inž.

Sava. Kranj in

prof. dr. Igor Emri, dipl. inž.

Fakulteta za strojništvo, Ljubljana