

RAČUNALNIŠKO KRMILJENO PREIZKUŠEVALIŠČE ZA RAZISKAVO MATERIALOV MEHANSKIH DRSNIH TESNIL

COMPUTER CONTROLLED TEST RIG FOR TRIBOLOGICAL RESEARCH OF MATERIALS FOR MECHANICAL SEALS

Anton Vezjak, Jože Vižintin

Center za tribologijo in tehnično diagnostiko, Bogiščeva 8, 1000 Ljubljana, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 1999-11-16; sprejem za objavo - accepted for publication: 1999-12-20

Mehanska drsna tesnila spadajo med dinamična gredna tesnila. Primarno tesnjenje omogoča drsni kontakt dveh tesnilnih obrobov, ki je geometrijsko analogen kontaktu pri aksialnih drsni ležajih. Glavni poudarek pri razvoju teh tesnil je na tribološki konstrukciji tesnilnih obrobov. Ti so v drsnem kontaktu izpostavljeni fenomenom, kot so trenje, obraba, mazanje, kemična interakcija s tesnjenim medijem (korozija), hidrodinamika in prenos toplote. Izbira materialov tesnilnih obrobov je zato zelo pomembna, saj neposredno določa trajnostno dobo in zanesljivost delovanja tesnil. Da lahko določeno dvojico materialov tesnilnih obrobov ovrednotimo, moramo delovanje kar se da dobro poznati. Preizkusi na triboloških modelnih preizkuševališčih zaradi specifičnosti geometrije kontakta in razmer pri obratovanju ponavadi ne dajo s prakso primerljivih rezultatov. Zato je za ovrednotenje materialov in delovanja tesnil v večini primerov še vedno potrebno preizkušanje na dragih realnih sistemih. V prispevku je predstavljeno preizkuševališče s preskusno glavo lastne konstrukcije, kjer lahko simuliramo realne razmere obratovanja mehanskih drsni tesnil. Opremljeno je s sodobnim računalniškim sistemom za sproti nadzor in krmiljenje osmih merilnih parametrov, kar nam omogoča natančen vpogled v razmere v tesnilu med preizkusom in s tem razumevanje delovanja tesnila.

Ključne besede: mehanska drsna tesnila, preskušanje, tribologija, materiali tesnilnih obrobov

Mechanical seals are dynamic shaft seals in which primary sealing takes place between surfaces in sliding contact of two mated seal faces. The most important aspect of development of mechanical seal is the tribological design of the seal faces. Seal faces are exposed to severe conditions which are determined with phenomena such as friction, wear, lubrication, chemical interaction with sealing fluid (corrosion), hydrodynamics and heat transfer. Therefore seal life and reliability are very much influenced by seal face material selection. For purpose to evaluate certain seal face material pair performance and therefore conditions in the seal must be well known. Results of testing on tribological models due to specific contact geometry and operating conditions are not satisfactory for practical comparable applications. Therefore testing on expensive real systems are still required for seal material evaluation in the most cases. In the paper test rig of our own design is presented on which we simulate real operating condition of mechanical seals. The test rig is equipped with advance computer system for on-line control and monitoring of eight measured parameters which enables detail determination of conditions during seal testing and better understanding of seal performance.

Key words: mechanical seals, testing, tribology, seal face materials

1 UVOD

Mehanska drsna tesnila se uporabljajo v širokem spektru delovnih razmer v najrazličnejših mehanskih sistemih, kot so: črpalke, kompresorji, mešalniki, ipd.¹⁻³. Najpomembnejša funkcija mehanskih drsni tesnil je zagotoviti varno in zanesljivo tesnjenje delovnega medija. Tesnilni obroči so najbolj kritični del tesnila, saj so v tribološkem kontaktu izpostavljeni neugodnim razmeram. Le-te določajo visoki tlaki, visoke relativne drsne hitosti, visoke temperature in kemična interakcija s tesnjenim medijem.

Tesnjenje pa ne določajo samo lastnosti uporabljenih materialov, ampak tudi dejavniki, ki vključujejo konstrukcijo in delovne razmere^{1,4,5}.

Nepričakovane predčasne poškodbe in nepredvidljiva nizka trajnostna doba v nekaterih primerih kažejo, da razumevanje delovanja mehanskih drsni tesnil še ni v celoti razjasnjeno^{3,6-8}. Z namenom, da bi povečali razumevanje triboloških mehanizmov v tesnilni špranji, da bi

pravilno ovrednotili materiale tesnilnih obrobov in da bi povečali zgornje meje obratovanja mehanskih drsni tesnil, je potrebna natančna raziskava njihovega vedenja med delovanjem^{9,10}.

Ponavadi se za tribološko raziskavo materialov tesnilnih obrobov uporabljajo standardni ali modificirani modelni preskusi, kot sta "valjček-disk"¹¹⁻¹⁴ in "štirikrogelni" preskus¹⁵⁻¹⁸, vendar imajo le-ti omejeno uporabo. Omejitve so povezane predvsem s specifičnostjo geometrije kontakta in z dinamičnimi karakteristikami tesnilnega sistema, zato rezultati preizkušanj v veliki meri niso zadovoljivi za prakso. Po drugi strani pa imajo mehanski sistemi v realnih razmerah poleg visoke cene še omejitve dostopa merilne opreme do komponent tesnila⁹. Posebno in obenem glavno vlogo pri razvoju ter sedanjem razumevanju osnov delovanja mehanskih drsni tesnil imajo namenska preizkuševališča^{9,19-22}.

Namen prispevka je predstaviti laboratorijsko preizkuševališče s preskusno glavo in možnosti računalniško podprtega merilnega sistema pri nadziranju ter

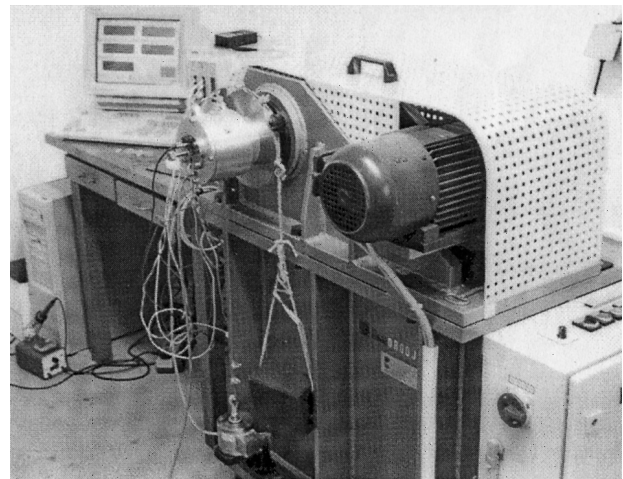
ovrednotenju delovanja mehanskih drsnih tesnil. Uporabnost preizkuševališča in merilnega sistema je prikazana z analizo enega preizkusa.

2 OPIS PREIZKUŠEVALIŠČA

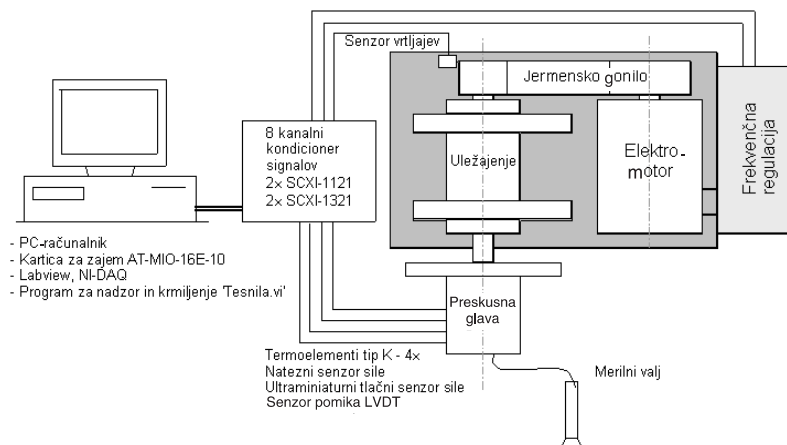
Kot izhodišče za zasnovo koncepta preizkušanja mehanskih drsnih tesnil nam je rabilo preizkuševališče CTD-ML1²³, ki ga prikazuje **slika 1**. Preizkuševališče je namenjeno za široko področje delovnih razmer, kar omogoča, da se zelo približamo razmeram pri realnih mehanskih sistemih. Uporaba in namen preizkuševališča je odvisna od izvedbe preskusne glave, ki je pritrjena na pogonsko gred.

Preizkuševališče, ki je opremljeno s sodobnim računalniškim sistemom, omogoča nadzor in krmiljenje osmih merjenih veličin. Shemo nadzora in krmiljenja preizkuševališča prikazuje **slika 2**.

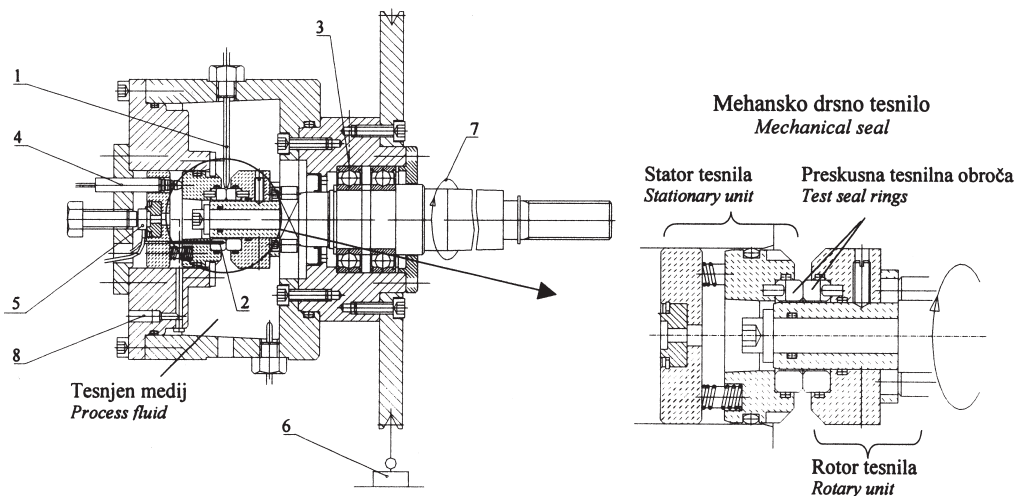
Za potrebe raziskav materialov mehanskih drsnih tesnil smo razvili ustrezno preskusno glavo (**slika 3**).



Slika 1: Preizkuševališče CTD-ML1
Figure 1: Test rig CTD-ML1



Slika 2: Shema nadzora in krmiljenja preizkuševališča
Figure 2: Computer control and monitoring scheme of the test rig



Slika 3: Preskusna glava in izvedba preskusnega tesnila
Figure 3: Test chamber and test seal layout

Zaradi fleksibilno zasnovane konstrukcije in skrbno izbranih materialov nam preskusna glava omogoča:

- raziskavo mehanizmov trenja, obrabe in mazanja v mehanskih drsnih tesnilih
- raziskavo vplivov obdelave tesnilnih obročev na razmere v tesnilni špranji
- preskušanje novih materialov
- preskušanje primernosti in funkcionalnosti neke konstrukcije mehanskih drsnih tesnil
- trajnostne preskuse materialov tesnilnih obročev
- raziskavo vplivov različnih medijev na funkcionalnost in vedenje tesnila, ...

Med preizkušanjem lahko spremljamo naslednje merilne veličine (slika 3):

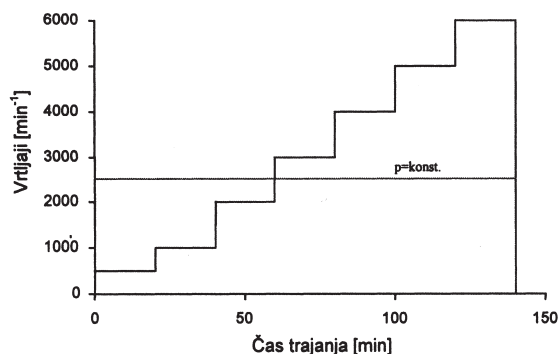
- temperaturo tesnjenega medija v okolici zunanjega premera tesnilnih obročev (1)
- temperaturo primarnega (mirujočega) tesnilnega obroča (2)
- temperaturo ležajev (3)
- temperaturo okolice
- pomik primarnega tesnilnega obroča (4)
- skupno silo na primarni tesnilni obroč (5)
- skupno silo trenja v tesnilu in ležajih (6)
- število vrtljajev gredi (7) in
- količino puščanja tesnilnega sistema (8).

3 PRIMER REZULTATOV PREIZKUŠANJA

Uporabnost in učinkovitost preskusne glave ter merilnega sistema je prikazana na primeru raziskave obratovalnih mej materialov za tesnilne obroče.

Slika 4 prikazuje potek preizkusa za določevanje zgornje meje obratovanja (PV_{lim}) za izbran par materialov tesnilnih obročev. Na začetku preizkusa smo preko vijaka in vzmeti nastavili določen tlak na tesnilno površino in stopenjsko povečevali drsno hitrost v kontaktu obročev. Hitrost smo povečevali, vse dokler ni prišlo do takih obratovalnih razmer, pri katerih je tesnilo izgubilo svojo funkcionalnost in začelo prekomerno puščati.

Slika 5 prikazuje potek povprečnih vrednosti izmerjenih veličin pri dvojenju dveh tesnilnih obročev iz

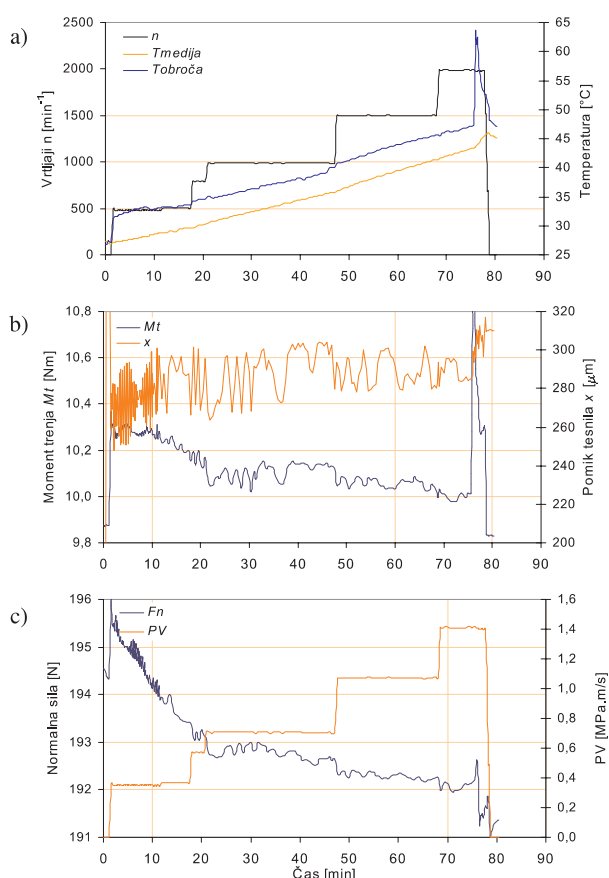


Slika 4: Potek preizkusa za določevanje PV_{lim}

Figure 4: Test procedure for PV test

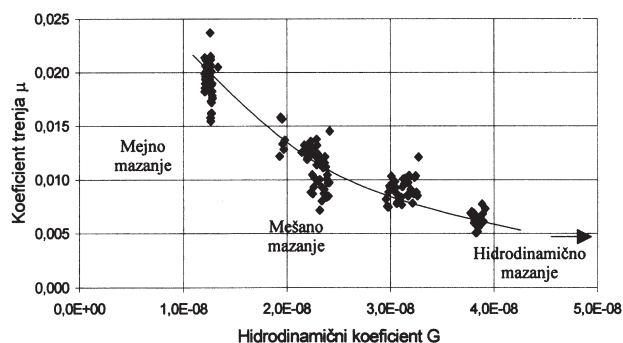
99,7% Al_2O_3 . Tlak na tesnilno površino na začetku preizkusa je bil 0,55 MPa.

Vrtlilno hitrost smo med preizkusom stopenjsko povečevali, kot prikazuje potek na sliki 5a. Tesnilna obroča sta bila potopljena v vodo s $pH \sim 7$. Zajem merilnih veličin je bil vsakih 30s s hitrostjo vzorčenja 10000 točk/s. Vsaka točka v diagramu pomeni povprečje 1000 izmerjenih točk. V prvem delu preizkusa (pri 500 min^{-1}) je moment trenja padel. Vzrok zato je bil zmanjšanje normalne sile na tesnilno površino, ki je posledica obrabe zaradi utekanja površin. Da je pri tem delu res prišlo do sicer minimalne obrabe, kaže tudi pomik obroča v pozitivno smer (slika 5b). Pri prehodu na višjo vrtlilno hitrost so se razmere v tesnilnem kontaktu spremenile. Normalna sila in pomik obroča sta se sorazmerno ustalila, zato se je ustalil tudi moment trenja. Iz spremembe naklona poteka temperature obroča (slika 5c) je razvidno, da se je povečala generacija torne toplote kljub ugodnemu poteku momenta trenja. Pri nadaljnjem povečevanju vrtlilne hitrosti gredi je usmerjenost merilnih veličin analogna, vse dokler nismo dosegli kritične količine ustvarjene torne toplote. Le-ta povzroči porušitev tesnilne površine materialov obročev. Pri keramičnih obročih iz Al_2O_3 smo opazili, da je prišlo do razpok in odstopanja zrn na tesnilni površini, kar je



Slika 5: Potek posameznih veličin med preizkusom

Figure 5: Measured parameters during the test



Slika 6: Režimi mazanja med preizkusom
Figure 6: Lubrication regimes during the PV test

povzročilo spremembo obrabnega mehanizma^{18,24-26}. Praktično so vsi merjeni parametri to spremembo zaznali.

Omenjeni diagrami nam neposredno zelo malo povedo o mazalnih razmerah v tesnilni špranji, ki so ključnega pomena za razumevanje delovanja mehanskih drsnih tesnil. Zato smo uporabili dodatno veličino - hidrodinamični koeficient $G^{2,3}$. Hidrodinamični koeficient je brezdimenzijsko število, ki ga določajo viskoznost medija, drsna hitrost, sila na tesnilno površino in dimenzije obrocev. Z analizo diagramov koeficient trenja μ - G lahko določimo režim mazanja v tesnilni špranji. **Slika 6** prikazuje diagram μ - G za prej omenjeni preizkus.

Iz diagrama lahko razberemo, da z višanjem vrtilne hitrosti prehajamo iz mejnega v tribološko ugodnejše mešano mazanje. Naj poudarimo, da gre pri tem za povprečni režim mazanja v tesnilni špranji in da se lahko na različnih mestih tesnilne površine istočasno pojavijo različni režimi mazanja. To pomeni, da je delež mehanskih kontaktov vršičkov hrapavosti obeh površin, ki se sicer z večanjem vrtilne hitrosti zmanjšuje, vedno navzoč. S tem pa glavni vir ustvarjanja torne toplote, ki ga predstavljajo ti lokalni mikrokontakti³. Na osnovi tega lahko razložimo prej omenjeno povečanje temperature, kljub zmanjšanju momenta trenja.

Iz analize navedenega primera je razvidno, kako pomembno je spremljanje čim večjega števila parametrov med obratovanjem. Praktično edino na ta način lahko z nekoliko večjo zanesljivostjo razložimo kompleksno dogajanje v tesnilni špranji.

4 SKLEP

Na predstavljenem primeru se je izkazalo, da je preizkuševališče nadvse primerno za raziskavo delovanja in razlago mehanizmov v mehanskih drsnih tesnilih. Sodobni računalniški merilni sistem, ki omogoča sprotni nadzor merjenih parametrov in krmiljenje preizkusov, bistveno prispeva k zanesljivosti in učinkovitosti ovrednotenja tesnila. Na preizkuševališču je možno simulirati realne delovne razmere v širokem spektru.

Preskusna glava se je izkazala primerna za preizkušanje mehanskih drsnih tesnil različnih dimenzij in različnih konstrukcijskih izvedb. Zaradi skrbne izbire materialov, iz katerih je izdelana preskusna glava, je mogoče preizkušanje tudi v različnih medijih. Preizkuševališče s preskusno glavo uspešno uporabljamo pri raziskavah in razvoju novih materialov ter konstrukcij mehanskih drsnih tesnil, ki jih financira industrija.

5 LITERATURA

- ¹ E. Mayer, *Mechanical Seals*, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, **1977**, 1-9, 14
- ² Product Review: Mechanical Seals, *Industrial Lubrication and Tribology*, 44 (**1992**) 6, 6-23
- ³ A.O. Lebeck, *Principles and Design of Mechanical Face Seals*, John Wiley & Sons, **1991**, 1-2, 16, 18, 139, 394
- ⁴ R. Divakar, *Materials Engineering*, Jahanmir, S. (Ed.), Friction and wear of ceramics, section 15, Marcel Dekker Inc., New York, 6, **1994**, 357-381
- ⁵ A.O., Lebeck, Dynamic seals, *Tribology Data Handbook*, section 66, Ed. E. R. Booser, CRC Press, **1997**, 734-757
- ⁶ R.K. Flitney, B.S.Nau, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A*, 201 (**1987**) A1, 17-28
- ⁷ B.S. Nau, *Tribol. Int.*, 19 (**1986**) 4, 183-186
- ⁸ P.A. Conner, M.T. Thew, *Industrial Lubrication and Tribology*, 47 (**1995**) 2, 4-11
- ⁹ M.W. Williams, V.J. Pilletteri, *Lubrication Engineering*, 52 (**1996**) 11, 809-815
- ¹⁰ L.A. Young, A.O. Lebeck, *ASME Journal of Lubrication Technology*, 104 (**1982**) 4, 439-448
- ¹¹ P. Andersson, O. Ylostalo, *Mater.Sci.and Eng. A*, A109 (**1989**) 1-2, 407-413
- ¹² Y.M. Chen, B. Rigaut, F. Armanet, *Lub. Eng.*, 47 (**1991**) 7, 531-537
- ¹³ L. Esposito, G. Nicoletto, A. Tucci, A. Salomoni, *Key Engineering Materials*, 132-136 (**1997**) 3, 1528-1531
- ¹⁴ M.G. Gee, Surfaces and Interfaces. *Joint Meeting Institute of Ceramics and Society of Glass technology Birmingham*, October 23-24, 1990, Institute of Ceramics; Br.Ceram.Proc., **1991**, 48, 11-24
- ¹⁵ D.E. Deckman, S. Jahanmir, S.M. Hsu, Wear of Materials, *Int. Conf. on Wear of Materials Orlando*, April 7.-11., 1991, Ludema, K.C., Bayer, R.G. (Eds.), ASME **1991**, 359-366
- ¹⁶ R.S. Gates, S.M. Hsu, E.E. Klaus, *Tribol Trans*, 32 (**1989**) 3, 357-363
- ¹⁷ H. Kim, D. Shin, T.E. Fischer, *Proceedings of the Japan International Tribology Conference. III*, Nagoya, 29.10.-1.11.1990, Japan Society of Tribologists, **1990**, 1437-1442
- ¹⁸ Y.S. Wang, S.M. Hsu, R.G. Munro, *Lub. Eng.*, 47 (**1991**) 1, 63-69
- ¹⁹ R. Metcalfe, R.D. Watson, *Lub. Eng.*, 39 (**1983**) 3, 275-284
- ²⁰ A.J. Ryde-Weller, M.T. Thew, R. Wallis, *Proceedings of the 12th International Conference on Fluid Sealing*, Brighton, UK, May 10-12, 1989, BHRA, **1989**, 343-366
- ²¹ J.A. Silvaggio, M.J. Lipski, K. Van Bramer, *Lub. Eng.*, 43 (**1987**) 6, 433-439
- ²² L.C. Erickson, A. Blomberg, S. Hogmark, S. Bratthal, *Tribol. Int.*, 26 (**1993**) 2, 83-92
- ²³ M. Kalin, Master thesis, Faculty of Mech. Engineering, Ljubljana, **1996**
- ²⁴ J.F. Braza, H.S. Cheng, M.E. Fine, A.K. Gangopadhyay, L.M. Keer, R.E. Worden, *Tribol.Trans.*, 32 (**1989**) 1, 1-8
- ²⁵ F. Xiong, R.R. Manory, L. Ward, M. Terheci, S. Lathabai, *Journal of the American Ceramic Society*, 80 (**1997**) 5, 1310-1312
- ²⁶ S. Kim, K. Kato, K. Hokkirigawa, *J. JSLE Int.Ed.*, 8 (**1987**) 123-128