

VPLIV MAZALNIH RAZMER NA TRIBOLOŠKO VEDENJE MATERIALOV TESNILNIH OBROČEV V MEHANSKIH DRSNIH TESNILIH

THE INFLUENCE OF LUBRICATING CONDITIONS ON THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF FACE MATERIALS IN MECHANICAL SEALS

Anton Vezjak, Jože Vižintin

Univerza v Ljubljani, Center za tribologijo in tehnično diagnostiko, Bogiščičeva 8, 1000 Ljubljana, Slovenija
anton.vezjak@ctd.uni-lj.si

Prejem rokopisa - received: 2001-09-18; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-11-10

Glavni problem pri razvoju mehanskih tesnil je tribološka konstrukcija tesnilnih obročev, ki poleg ostalega zajema izbiro materialov in določitev triboloških lastnosti para tesnilnih obročev znotraj delovnega območja. Na samo obratovanje mehanskega drsnega tesnila vpliva več dejavnikov, izmed katerih je mazanje eden izmed najvplivnejših. V prispevku obravnavamo vpliv različnih mazalnih razmer na tribološke parametre parov tesnilnih obročev.

T. i. PV-preskuse, smo izvedli na računalniško krmiljenem preskuševališču lastne konstrukcije, kjer smo med preskusom nadzorovali osem merilnih veličin. Kot preskusne materiale tesnilnih obročev smo uporabljali keramiko Al_2O_3 , nerjavno jeklo in grafit, ki smo jih dvojili v različnih kombinacijah. Preskušali smo v vodi iz vodovodnega omrežja (pH~7).

Rezultati so pokazali, da različne mazalne razmere v tesnilu, ki so večinoma odvisne od obratovalnih parametrov, bistveno vplivajo na vrednosti triboloških parametrov, kot so koeficient trenja, obraba in zgornja meja obratovanja. To velja za vse preskušane pare materialov.

Ključne besede: mehanska drsna tesnila, mazanje, trenje, obraba

The most important aspect of development of the mechanical seals is the tribological design of the seal faces. Tribological design involves, among other things, the selection of materials and defining the tribological characteristics of the sealing pair within the working limits. The performance of a mechanical face seal depends on many factors, of which lubrication has one of the most crucial roles. In this paper the influence of various lubricating conditions on different tribological parameters is analysed.

Short-interval PV tests were performed on a computer-controlled test rig of our own design, where eight parameters were monitored online. Commercially available alumina, stainless steel and carbon-graphite were tested in tap water.

The results show that for all material pairs, tribological parameters such as the friction coefficient, the wear and the pressure-velocity limit are affected by the lubricating conditions in the sealing dam.

Key words: mechanical seals, lubrication, friction, wear

1 UVOD

Vedno ostrejše ekološke in varnostne zahteve glede puščanja silijo uporabnike in proizvajalce k nenehnem iskanju novih načinov tesnjenja, izpopolnjevanju konstrukcij ter uvajanju novih materialov v obstoječa tesnila in tesnilne sisteme.

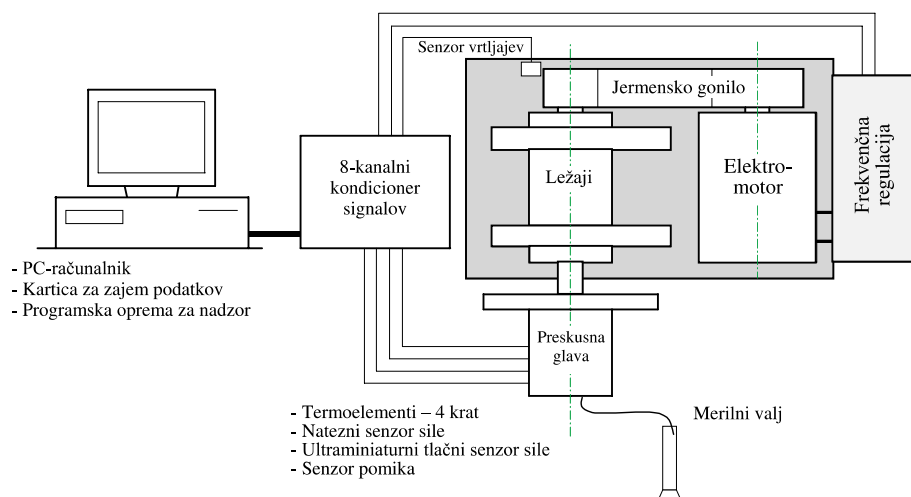
Eden izmed najučinkovitejših načinov tesnjenja vrtečih se gredi v industriji je izvedeno z mehanskimi drsnimi tesnili. Za njih je značilno, da primarno tesnjenje omogoča čelni kontakt dveh tesnilnih obročev, ki je geometrijsko analogen kontaktu, ki nastopa pri aksialnih drsnih ležajih. Eden izmed tesnilnih obročev je pri tem pritrjen v ohišje sistema, medtem ko se drugi obroč z gredjo vrti.

Prednost mehanskih drsnih tesnil je predvsem v manjši obrabi, manjši tvorbi toplote, nižji porabi energije, manjši potrebi po vzdrževanju in boljšem nadzoru nad puščanjem.

Tesnilni obroči so v drsnem kontaktu izpostavljeni pojavom, kot so trenje, obraba, mazanje, korozija, hidro-

dinamika in prenos toplote. Ker mora biti za učinkovito tesnjenje zadoščeno več merilom hkrati, je za tesnilne obroče primeren le omejen obseg materialov. V praksi namreč velja pravilo, da rajši izberemo tesnilo s slabšo konstrukcijo in dobro kombinacijo materialov kot pa tesnilo z dobro konstrukcijo in neprimernimi materiali tesnilnih obročev¹.

V splošnem se smatra, da medij, ki ga tesnimo, pronica v tesnilno špranjo med obročema, kjer formira tanko tekočinsko plast. Slednja zagotavlja mazanje in preprečuje nezaželen mehanski kontakt vršičkov hrapavosti med materialoma tesnilnih obročev. Mehanski kontakt se v večini primerov mehanskih drsnih tesnil kljub temu pojavi, če že ne med samim obratovanjem, npr. zaradi nihanja tlaka tesnjenega medija, pa prav gotovo pri zaganjanju in izklapljanju pogona sistema. Že zaradi samega dejstva, da je plast zelo tanka, obstaja velika verjetnost, da bo v neki fazi obratovanja do takšnega kontakta prej ali slej prišlo²⁻⁴.



Slika 1: Shema preskuševališča
Figure 1: Test-rig scheme

Pri mehanskem kontaktu, tribološke lastnosti tesnilnih obročev določajo učinkovitost tesnjenja in trajnostno dobo tesnila. Zato je tribološka kompatibilnost med materiali in medijem pri drsenju v tesnilu zelo pomembna. Tribološke lastnosti se vedno nanašajo na dvojico elementov, ki sta v kontaktu, zato je smiselno govoriti o triboloških lastnostih ne samo enega materiala, ampak kombinacije, ki nastopa v kontaktu.

Med parametre, s katerimi navadno ovrednotimo tribološke lastnosti spadajo, koeficient trenja, obraba in mejni produkt tlak-hitrost (PV_{lim}), ki je t. i. zgornja meja obratovanja dvojice materialov. V splošnem so tribološke lastnosti odvisne od obratovalnih razmer v tribološkem kontaktu, ki jih določajo tlak, hitrost, temperatura, lastnosti medija ipd. Omenjeni parametri po drugi strani določajo tudi režim mazanja, ki nastopi v tesnilni špranji. Vpliv mazanja na parameter PV_{lim} je opisan v literaturi ^{5,6}.

V tem prispevku je predstavljen vpliv režimov mazanja na koeficient trenja in obrabo za različne dvojice materialov tesnilnih obročev.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Preskuševališče

Preskuse smo izvajali na preskuševalnem sistemu, ki ga shematsko prikazuje **slika 1**. Podroben opis sistema je podan v literaturi ^{8,7}. Za potrebe raziskav mehanskih drsnih tesnil smo razvili in izdelali posebno preskusno glavo, ki smo jo montirali v pogonsko gred sistema.

Slika 2 prikazuje preskusno glavo s preskusnim tesnilom in merilnimi mesti. Želeni povprečni tlak na tesnilni kontakt med obročema smo nastavljali z vijakom in vzmetmi, skladno z enačbo ⁹:

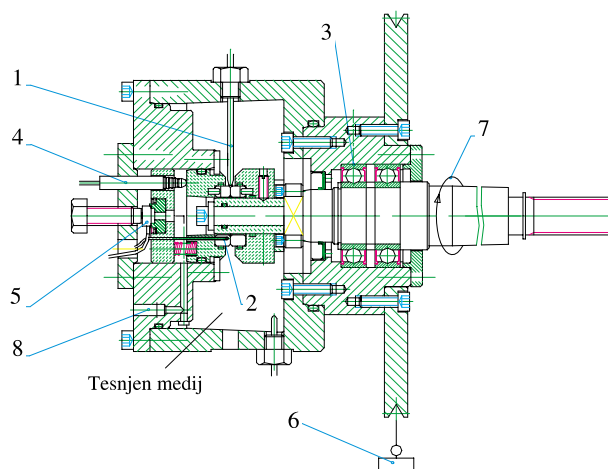
$$p_m = \Delta p(B - K) + p_{sp} \quad (1)$$

kjer je Δp [MPa] tlačna razlika tesnjenja, B [-] razbremenitveno razmerje, K [-] tlačni gradient preko tesnilne površine in p_{sp} [MPa] tlak vzmeti.

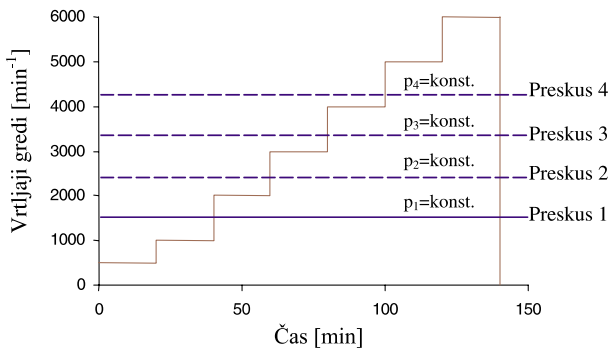
Z namenom da bi izločili vpliv hidrostaticnega tlaka, so bili vsi preskusi izvedeni brez nadtlaka tesnjenega medija. Zgornji izraz (enačba 1) se zato reducira v obliko:

$$p_m = p_{sp} \quad (2)$$

Med preskusi smo z računalniško podprtim merilnim sistemom za zajem podatkov sproti spremljali naslednje veličine (**slika 2**): temperaturo medija neposredno ob tesnilnem kontaktu (1), temperaturo mirujočega tesnilnega obroča (2), temperaturo v ležajih (3), aksialni pomik tesnilnega obroča (4), povprečno silo na tesnilni kontakt (5), moment trenja (6), vrtilno hitrost gredi (7) in povprečno količino puščanja skozi tesnilno špranjo (8).



Slika 2: Preskusna glava z merilnimi mesti
Figure 2: Test chamber with measuring points



Slika 3: Potek preizkusa
Figure 3: Test procedure

2.2 Materiali in način preskušanja

Za preskušanje smo izbrali tesnilne obroče iz komercialne keramike Al_2O_3 domačega proizvajalca z različno gostoto (92, 96 in 99,7 %), nerjaveče jeklo W.NR.1.4024 in grafit s komercialno oznako *ELLOR 25*. Materiale smo dvojili med seboj v različnih kombinacijah. Vsi tesnilni obroči so bili mehansko obdelani z brušenjem in ročnim poliranjem na povprečno vrednost parametra hrapavosti $R_a < 0,2 \mu m$.

Pri vseh preskusih je bil tesnen medij voda iz omrežne vodovodne napeljave z vrednostjo $pH \sim 7$, preskusi pa so potekali po spodaj opisanem postopku.

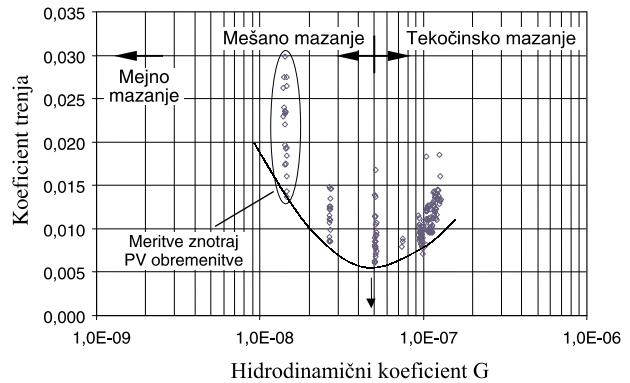
Na začetku vsakega preskusa smo z vijakom in vzmetmi najprej nastavili želen povprečni tlak na tesnilno površino. Preskus smo pričeli pri 500 vrtljajih gredi na minuto, nato smo vrtljaje po določenih časovnih intervalih postopoma zviševali. Vrtljaje smo povečevali, dokler nismo dosegli ali zgornjo mejo obratovanja, kjer je prišlo do porušitve dvojenih materialov, ali maksimalno vrtilno hitrost sistema. V primeru, da do porušitve materialov ni prišlo niti pri maksimalni vrtilni hitrosti gredi sistema, smo tlak na tesnilno površino višali in postopek z novimi pari preskušancev ponavljali do njihove porušitve (slika 3).

Z omenjenim načinom preskušanja smo določili področje uporabnosti za posamezne pare materialov.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Zaradi geometrijske podobnosti obravnavamo mazanje v mehanskih drsnih tesnilih analogno kot pri aksialnih drsnih ležajih. Največkrat se za karakterizacijo razmer oz. režimov mazanja v mehanskih drsnih tesnilih uporablja brezdimenzijski delovni parameter G ¹⁰, ki ga včasih imenujemo tudi hidrodinamični koeficient G . Definiran je kot:

$$G = \frac{\eta \cdot V \cdot b}{F} \quad (3)$$



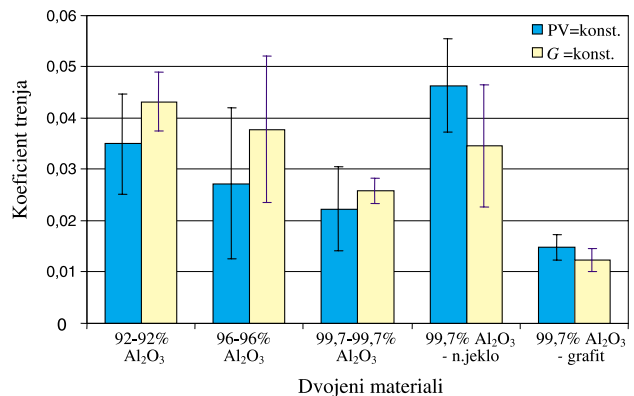
Slika 4: Koeficient trenja v odvisnosti od režimov mazanja
Figure 4: Friction coefficient and lubrication regimes

kjer so η [Pas] dinamična viskoznost tesnjenega medija, V [m/s] srednja drsna hitrost, b [m] širina tesnilne površine in F [N] sila na tesnilno površino.

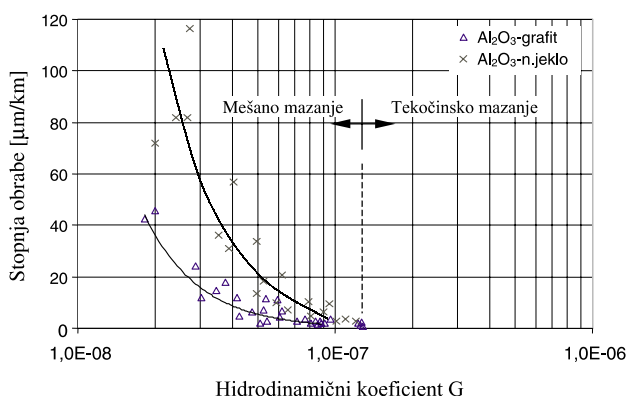
Analizo in identifikacijo režimov mazanja, v našem primeru je mazivo tesnjena voda, smo opravili z uporabo diagramov koeficienta trenja v odvisnosti od delovnega parametra G . Primer takšnega diagrama za par keramika - nerjavno jeklo prikazuje slika 4. Območje nizkih vrednosti parametra G je značilno za suho in mejno mazanje, medtem ko so višje vrednosti značilne za tekočinsko mazanje. Minimum krivulje oz. karakteristična vrednost delovnega parametra G pri prehodu iz mešanega režima mazanja v režim tekočinskega se spreminja, saj je odvisna od vrste dvojenih materialov, hrapavosti tesnilnih površin in konstrukcije tesnila¹¹. Natančen vpliv slednjih še ni popolnoma raziskan.

3.1 Koeficient trenja

Zaradi specifičnega načina in pogojev preskušanja, ki zajemajo spremembo tlaka, hitrosti, hrapavosti zaradi obrabe, mazanje ipd., pri samem preskusu, primerjava koeficientov trenja v časovnih diagramih ni najbolj primerna.



Slika 5: Povprečni koeficienti trenja za pare materialov v režimu mešanega mazanja ($G = konst.$)
Figure 5: Average friction coefficients in a mixed lubrication regime



Slika 6: Stopnja obrabe parov v odvisnosti od mazalnih razmer v tesnilu

Figure 6: Wear rate under different lubricating conditions

Koeficiente trenja smo zato primerjali v razmerah, ko so v tesnilni špranji nastopili enaki režimi mazanja. Na **sliki 5** so prikazani povprečni koeficienti trenja različnih parov materialov v režimu mešanega mazanja.

Najnižji povprečni koeficient trenja smo pri vzajemnem dvojenju keramičnih materialov izmerili pri parih 99,7% Al_2O_3 (0,025), najvišjega pa pri 92% Al_2O_3 (0,042). Relativno nizke absolutne vrednosti so po vsej verjetnosti posledica tvorbe tribo-plasti iz hidroksidov, ki deluje kot trdo mazivo med obema keramičnima površinama¹². Glavna mehanizma trenja sta plastična deformacija^{13,14} in mehansko zatikanje vršičkov hrapavosti površine¹⁵. Višjemu koeficientu trenja pri keramiki z nižjo gostoto lahko pripišemo večji nehomogenosti mikrostrukture površine.

Povprečni koeficient trenja parov 99,7% Al_2O_3 - nerjavno jeklo (0,035) je višji kot pri parih 99,7-99,7% Al_2O_3 (0,025), vendar nižji kot pri dvojenju preostalih dveh keramik (0,038 pri 96% in 0,042 pri 92% Al_2O_3). Razlog za to je večja adhezija za pare keramika - jeklo kot pri parih keramika-keramika¹⁵.

Zaradi znanih dobrih mazalnih lastnosti grafitu^{16,17} je povprečni koeficient trenja parov 99,7% Al_2O_3 - grafit od vseh kombinacij materialov najnižji (0,012).

Za primerjavo so v diagramu prikazani tudi povprečni koeficienti trenja pri konstantnem produktu tlak - drsna hitrost (PV), ki je merilo za termomehansko obremenitev kontakta.

3.2 Obraba

Obrabo materialov smo ugotovili z analizo aksialnih pomikov pomičnega tesnilnega obroča. Pri keramičnih parih obrabe ni bilo mogoče zaznati z merjenjem pomikov vse do nenadnega uničenja površin zaradi termične preobremenitve. Značilen krhki lom zrn mikrostrukture na površini keramike¹⁸ je glavni obrabni mehanizem, ki je ob tem nastopal.

Bistveno večjo obrabo obročev smo dobili pri preizkušanju parov 99,7% Al_2O_3 - nerjavno jeklo in parov 99,7% Al_2O_3 - grafit.

V področju nizkih PV-obremenitev je nastala obraba samo pri mehkejših obročih iz grafitu in nerjavnega jekla, pri višjih PV-obremenitvah pa tudi na keramičnih obročih. Pri slednjem trdi obrabni delci keramike v tesnilni špranji delujejo kot abrazivni material, kar privede do hitrega uničenja tesnilnega para. V takih razmerah, ki so v tesnilu nezaželeni, tekočinskega mazanja praktično ni možno doseči.

Slika 6 prikazuje primerjavo stopnje obrabe jeklenih in grafitnih obročev pri nizkih PV-obremenitvah v odvisnosti od mazalnih razmer v tesnilu.

Z diagrama lahko razberemo, da se tesnilni obroči iz nerjavnega jekla pri enakih razmerah mazanja bistveno bolj obrabljajo kot obroči iz grafitu. Po vsej verjetnosti gre to na račun večje adhezije pri parih nerjavno jeklo-keramika kot pri parih grafit-keramika¹⁹. Ker pri tekočinskem mazanju ni mehanskega kontakta obročev, obraba v tem področju ne nastane.

4 SKLEP

S posebnim načinom preskušanja smo raziskali vpliv različnih razmer pri mazanju na tribološke lastnosti, kot sta koeficient trenja in obraba, za različne pare materialov tesnilnih obročev. Režime mazanja v tesnilu smo analizirali z brezdimenzijskim parametrom G.

Koeficient trenja in obraba dvojenih materialov sta na splošno v veliki meri odvisna od režima mazanja v tesnilni špranji, ki vpliva na delež mehanskih kontaktov vršičkov hrapavosti obeh materialov.

Najnižje vrednosti koeficientov trenja v mešanem režimu mazanja, ki se največkrat pojavi v mehanskih drsni tesnilih, smo dosegli pri parih 99,7% Al_2O_3 - grafit, najvišje pa pri parih 92%-92% Al_2O_3 .

Za keramične pare je značilna nenadna porušitev površine materialov zaradi krhkega loma zrn mikrostrukture, medtem ko je prevladujoč obrabni mehanizem parov keramika-grafit in keramika-jeklo adhezija.

Brez poznanja režimov mazanja v tesnilni špranji je zelo težko ovrednotiti materiale tesnilnih obročev, saj vrednosti koeficientov trenja in obrabe nihajo tudi do 300%.

5 LITERATURA

- 1 E. Mayer, Mechanical Seals, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, 1977, 96
- 2 N. M. Wallace, Basic concepts of seal function and design. Chapter in Mechanical seal practice for improved performance, (Ed.) J.D.Summers-Smith, 2nd ed., Mechanical Engineering Publications Ltd., London 1992, 3-35
- 3 B. S. Nau, Research in mechanical seals, Chapter in Mechanical seal practice for improved performance, (Ed.) J.D.Summers-Smith, 2nd ed., Mechanical Engineering Publications Ltd., London 1992, 186-213

- ⁴ H. K. Muller, B. S. Nau, Fluid sealing technology, Marcel Dekker Inc., New York 1998, 215-272
- ⁵ A. Vezjak, J. Vižintin, The influence of the duty parameter G on the PV limit in mechanical seals, Proc. of the 16th Inter.Conf.on Fluid sealing, Brugge, Belgija 18.-20. sept. 2000, (Ed) R. K. Flitney, BHR Group Publication, Professional Engineering Publishing, London 2000, 411-420
- ⁶ A. Vezjak, J. Vižintin, The effect of operating conditions on the performance limit of mechanical seals, Proc. of the 9th Nordic Symp. on Tribology NORDTRIB 2000, Porvoo, Finska 11.-14. junij 2000 - Vol. 3, Espoo 2000, 1044-1053
- ⁷ M. Kalin, J. Vižintin, Rolling bearings and lubricants testing machine CTD-ML1, Journal of Mechanical Engineering, 45 (1997) 5-6, 239-247
- ⁸ A. Vezjak, J. Vižintin, Computer controlled test rig for tribological research of materials for mechanical seals, Mater. Tehnol. 34 (2000) 1-2, 99-102
- ⁹ K. Schoenherr, Design terminology for mechanical end face seals, Lubrication Engineering, 50 (1994) 11, 881-891
- ¹⁰ B. S. Nau, Hydrodynamic lubrication in Face seals, Proc. of the 3rd Inter. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Cambridge 1967, Paper E5.
- ¹¹ R. K. Flitney, B. S. Nau, Performance testing of mechanical seals, Proc. 13th Inter. Conf. on Fluid Sealing, (Ed.) Nau B. S., Kluwer Academic Publishers, London 1992, 441-466
- ¹² G. W. Stachowiak, A. W. Batchelar, Engineering Tribology, Tribology series 24, Elsevier, 1993, 755
- ¹³ I. M. Hutchings, A. Edward, Tribology: Friction and wear of Engineering Materials, A division of Hodder and Stoughton, London 1992, 116-122
- ¹⁴ L. Esposito, A. Tucci, Microstructural dependence of friction and wear behaviours in low purity alumina ceramics, Wear, 205 (1997) 1-2, 88-96.
- ¹⁵ K.-H. Zum Gahr, Microstructure and wear of materials, Tribology series 10, Elsevier, 1987, 90, 449
- ¹⁶ I. M. Hutchings, A. Edward, Tribology: Friction and wear of Engineering Materials, A division of Hodder and Stoughton, London 1992, 48-51
- ¹⁷ R. R. Paxton, Manufactured carbon: A self-lubricating material for mechanical devices, CRC Press Inc., 1979, 5-7
- ¹⁸ B. Gueroult, K. Cherif, State of the art review on friction and wear mechanisms of ceramics, Journal of the Canadian Ceramic Society, 63 (1994), 2, 132-142
- ¹⁹ R. L. Johnson, K. Schoenherr; Seal Wear, Chapter in Wear Control Handbook, (Eds.) M. B. Peterson and W. O. Winer, ASME, New York 1980, 727-753