



TRIBODIJAGNOSTIKA KINEMATSKOG KOEFICIJENTA TRENJA METODOM BLOK NA DISKU

TRIBODIAGNOSTICS OF THE KINETIC FRICTION COEFFICIENT BY BLOCK ON DISK METHOD

Radenko Blažević, Đorđe Vukelić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – PROIZVODNO MAŠINSTVO

Kratak sadržaj – U radu su prezentovani rezultati merenja kinematskog koeficijenta trenja na tribometru po metodi blok na disku. Blok i disk su izrađeni od čelika C45. Eksperimentalna istraživanja su sprovedena za različite nivoe broja obrta diska i pri različitim nivoima normalnog opterećenja bloka. Dobijeni rezultati su analizirani, diskutovani i komparirani. Na kraju su dati odgovarajući zaključci i pravci budućih istraživanja.

Ključne reči: Tribometar, kinematski koeficijent trenja

Abstract – The paper presents the results of measuring the kinetic friction coefficient on the tribometer by the disk on block method. Block and disc are made of steel C45. Experimental investigations were carried out for different levels of revolutions per minute, and at different levels of normal load. The obtained results were analysed, discussed and compared. At the end, appropriate conclusions and directions of future research are given.

Keywords: Tribometer, kinetic friction coefficient

1. UVOD

Tribologija je naučno-tehnička disciplina koja obuhvata istraživanja procesa trenja, habanja i podmazivanja, kao i postupaka za smanjenje i optimizaciju ovih procesa u različitim mašinskim sistemima [1]. U proizvodnim sistemima pod pojmom mehanički sistem podrazumevaju se sve vrste obradnih procesa, proizvodna i druga oprema. Obrada rezanjem odvija se, na primer, u mehaničkom sistemu koji čine alat i predmet obrade u relativnom kretanju. Pod pojmom tribo-mehanički sistem podrazumevaju se oni mehanički sistemi čije funkcionisanje zavisi u velikoj meri od veličine trenja i intenziteta habanja u zonama kontakta njihovih elemenata. Broj tribo-mehaničkih sistema u proizvodnim sistemima srednje veličine iznosi, po pravilu, nekoliko desetina hiljada. U njima se, za vreme trajanja proizvodnih procesa, pojavljuje trenje, u zonama kontakta koje treba savladati i habanje kritičnih elemenata, koje dovodi do zastoja proizvodnje zbog zamene pohabanih elemenata novim [2].

U većini slučajeva, u različitim pokretnim elementima mašina, uređaja i postrojenja, trenje je nepoželjna i štetna pojava. Na savladavanje sile trenja kao otpora kretanja bilo koje vrste, troši se znatna količina mehaničke energije.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Đorđe Vukelić, vanr. prof.

Kao posledica trenja na površinama u kontaktu dolazi do trošenja i zagrevanja površina. Međutim, trenje i trošenje su u nekim slučajevima neophodna i korisna fizička pojava.

Karakteristike tribo-mehaničkih sistema, u kojima se odvijaju procesi trenja i habanja, za vreme trajanja proizvodnih procesa, zavise od vrste materijala i uslova pod kojim se kontakt u njima ostvaruje (brzina relativnog kretanja, spoljašnje opterećenje, režim podmazivanja i sl.). Kontakt u osnovnim tribo-mehaničkim sistemima može biti između čvrstih elemenata izrađenih od različitih materijala, sa ili bez prisustva maziva [3].

Osnovni tribo-mehanički sistemi, bilo kojoj grupi da pripadaju, imaju iste ulazne, izlazne i izgubljene veličine. Ulazne veličine su masa, energija, kretanje, informacije i materijal. Izlazne i izgubljene veličine su iste vrste, ali sa promenjenim količinama. Izgubljene veličine su gubitak mase koji se javlja zbog postojanja procesa habanja u sistemu, gubitak energije kao posledica postojanja trenja u zonama kontakta i gubitak kretanja, koji se javlja kao posledica pojave klizanja i/ili kotrljanja [4].

Rešavanjem problema u zonama kontakta osnovnih tribo-mehaničkih sistema koji se odnose na smanjenje trenja i usporavanje procesa habanja, smanjuju se u značajnoj meri troškovi u proizvodnim sistemima. Primenom savremenih triboloških znanja na rešavanju problema trenja i habanja u osnovnim tribo-mehaničkim sistemima moguće je smanjiti [5]:

- Troškove održavanja i zamene pohabanih delova novim;
- Troškove proizvodnje koji nastaju zbog zastoja proizvodnih procesa izazvanih habanjem elemenata proizvodne i druge opreme;
- Troškove investicija u novu opremu zbog povećanja veka trajanja postojeće;
- Troškove energije zbog smanjenja trenja;
- Troškove podmazivanja;
- Troškove radne snage.

Tribološke karakteristike čvrstih materijala (elemenata tribo-mehaničkih sistema) i maziva određene su [5]:

- Intenzitetom sile trenja odnosno koeficijenta trenja u zoni kontakta elemenata sistema;
- Intenzitetom habanja kritičnog elementa sistema.

Izbor materijala i tehnologije obrade kontaktnih površina, izbor tehnologija za poboljšanje triboloških svojstava kontaktnih slojeva i izbor maziva vrši se isključivo na bazi trenja i intenziteta habanja kritičnog elementa u osnovnom tribo-mehaničkom sistemu. Kako je merenje

sila trenja ili koeficijenta trenja u realnim uslovima veoma teško, a često i nemoguće, ostaje samo mogućnost da se kroz simulaciju realne kontaktne situacije na tribometrima izvrši određivanje triboloških karakteristika merenjem sa aspekta trenja ili sa aspekta habanja [5].

2. TEORIJSKE OSNOVE

Trenje predstavlja mehanički otpor koji nastaje na površini dodira dva tela, a pri kretanju jednog tela po drugom ili pri međusobnom relativnom kretanju. Izražava se silom trenja ili koeficijentom trenja.

Prema stanju dodirnih površina, trenje se deli na [6]:

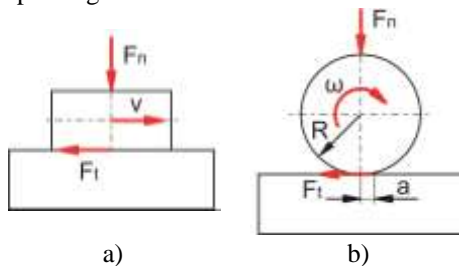
- suvo trenje - tela se dodiruju preko nepodmazanih površina,
- mokro trenje - tela se dodiruju preko podmazanih površina.

Prema agregatnom stanju tela, trenje se deli na [7]:

- unutrašnje trenje (viskoznost) - otpor međusobnom kretanju slojeva fluida (tečnosti i gasova) pod dejstvom kohezije i adhezije,
- spoljašnje trenje - otpor na površini dodira između čvrstih tela koji se suprotstavlja njihovom međusobnom kretanju.

Prema vrsti kretanja, trenje se deli na (slika 1) [8]:

- trenje klizanja - otpor koji se javlja na površinama dodira dva tela prilikom translacionog kretanja jednog tela po drugom,
- trenje kotrljanja - otpor koji se javlja na površinama dodira dva tela prilikom rotacionog kretanja jednog tela po drugom.



Slika 1. Trenje
a) klizanja, b) kotrljanja

Sila trenja je proporcionalna normalnoj sili koja deluje na površine koje su u kontaktu, što se može prikazati sledećim izrazom [9]:

$$F_t = \mu \cdot F_n \quad (1)$$

gde je F_t —sila trenja, μ —koeficijent trenja i F_n —normalna sila. Po ovoj teoriji sila trenja ne zavisi od veličine površina koje su u dodiru i brzine klizanja, već zavisi jedino od opterećenja, stepena hrapavosti i prirode materijala elemenata.

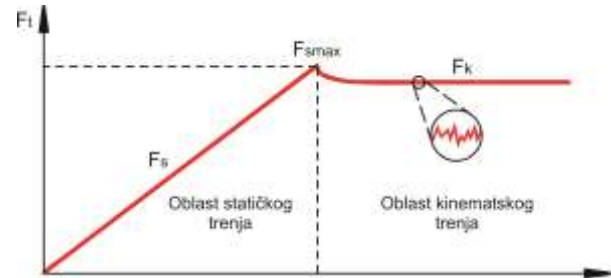
Koeficijent trenja ($\mu = F_t/F_n$), između ostalog, zavisi i od vrste materijala predmeta. Ako su tvrdoće kotrljajućeg tela i podloge dovoljno velike, a njihove površine idealne, može se pretpostaviti da će kod nekog opterećenja dodirno mesto biti tačka. Povećavanjem opterećenja, dolazi se u područje elastičnih deformacija, a dodirno mesto postaje površina. Usled savladavanja kotrljanja i deformacija, dolazi do porasta sile trenja i koeficijenta trenja. Iznad nekog graničnog opterećenja nastupa preopterećenje sa trajno plastičnim deformacijama.

Vrednosti koeficijenta trenja kotrljanja su znatno manje nego u slučaju klizanja u identičnim uslovima ostvarivanja kontakta [10].

Prema stanju kretanja tela, trenje se deli na [10]:

- trenje mirovanja (statičko trenje) - otpor koji se javlja na dodirnim površinama dva tela koja miruju,
- trenje kretanja (kinematsko trenje) - otpor koji se javlja na dodirnim površinama dva tela koja se kreću.

Zavisnost sile statičkog/kinematskog trenja klizanja od sile (opterećenja) prikazana je na slici 2.



Slika 2. Zavisnost sile statičkog/kinematskog trenja klizanja od sile tokom vremena

U stanju mirovanja sila trenja je na mestima kontakta površina veća ili jednaka sa rezultantom tangencijalnih sila koja izaziva kretanje. Trenje postoji na površini kontakta čvrstih tela i kada su tela u relativnom mirovanju, jer je potrebno uložiti znatnu silu da bi se izazvalo početno relativno kretanje. Nakon neke granične vrednosti sile telo se pokreće. Sila trenja potom raste do neke maksimalne vrednosti statičke sile trenja F_{smax} . Nakon toga sila trenja postaje kinematska sila trenja, a njena vrednost je nešto manja od statičke sile trenja $F_k < F_{smax}$. Potom se telo kreće savladavajući silu kinematskog trenja [10].

Vrste kinematskog trenja su [10]:

- trenje klizanja - pojava sile trenja ima za posledicu stvaranje toplote. To znači da važi zakon očuvanja energije: smanjivanje kinetičke energije tela prelazi u toplotnu energiju tela ili podloge (šibice funkcionišu upravo na tom principu gde ovaj efekat ima korisnu upotrebu);
- trenje kotrljanja - u slučaju kotrljanja tela po podlozi, trenje se javlja zato što se deo kinetičke energije troši na odvajanje od podloge, a deo na priljubljanje tela na podlogu. Sila trenja naročito dolazi do izražaja kada je podloga vlažna;
- trenje u tečnom sloju - u slučaju kretanja tela kroz neki fluid (tečnost ili gas) primećuje se usporavanje (sila trenja) čija veličina zavisi od vrste fluida kroz koji se telo kreće. Telo koje se kreće predaje deo svoje kinetičke energije atomima/molekulima fluida usled čega se delovi fluida počinju kretati (npr. nastajanje talasa).

3. ESPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Tribometar upotrebljen u eksperimentalnim istraživanjima (slika 3) koristi se za ispitivanje tribo-mehaničkih karakteristika različitih vrsta materijala u uslovima rada sa i bez primene maziva.



Slika 3. Tribometar

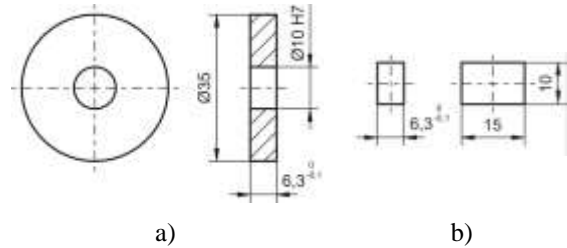
Osnovne karakteristike tribometra su:

- Fizički i merni opseg normalnog opterećenja pri merenju koeficijenta trenja: 0–140 N;
- Merni opseg sile trenja: 0–100 N;
- Opseg brzina klizanja: 0–3,6 m/s;
- Greška merenja < 1%;
- Uslovi merenja: sa i bez prisustva sredstva za hlađenje i podmazivanje sa mogućnošću regulacije protoka u intervalu 0–2 l/min;
- Fizički i konstruktivno onemogućen uticaj opterećenja na signal izmerene vrednosti sile trenja – onemogućeno mešanje signala;
- Mogućnost numeričkog i grafičkog prikaza rezultata merenja.

Procedura merenja svojstava na prikazanom tribometru je u skladu sa ASTM standardom [11]. Standardni uzorci diska i bloka sa kojima su izvršena eksperimentalna istraživanja su izrađeni od čelika C45. Geometrija diska i bloka je prikazana na slici 4.

Pre početka ispitivanja mere se parametri topografije diskova i blokova radi definisanja njihove hrapavosti. Merenje hrapavosti je izvršeno pomoću mernog uređaja "Surface Roughness Tester SR 9210".

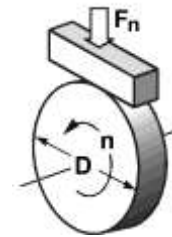
Hrapavost je merena po 10 izvodnica cilindra diska i u 10 pravaca kontaktne površine bloka. Srednja aritmetička vrednost hrapavosti diska je $R_a=1,604 \mu\text{m}$, a srednja aritmetička vrednost hrapavosti bloka je $R_a=1,602 \mu\text{m}$.



Slika 4. Geometrija a) diska, b) bloka

Merenje kinematskog koeficijenta trenja izvršeno je za kontaktni par block on disk. Varirane su vrednosti normalnog opterećenja bloka F_n i broja obrta diska n (slika 5). Istraživanja su sprovedena za sedam različitih vrednosti normalnog opterećenja bloka $F_n = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 \text{ N}$, i pet različitih brojeva obrta diska $N=120, 180, 240, 300$ i 360 obr/min . Izvršeno je $7 \times 5 = 35$ eksperimenata.

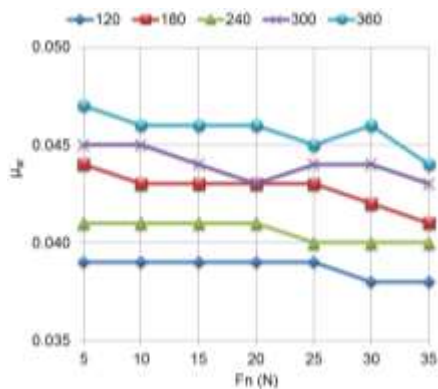
Vrednosti koeficijenta trenja su snimane tokom 30 sekundi. Eksperimentalna istraživanja su sprovedena u kontrolisanim uslovima, pri temperaturi $23 \text{ }^\circ\text{C}$, pritisku 1 bar i vlažnosti vazduha 55 %. Dobijeni rezultati, prikazani su u tabeli 1 i na slici 6.



Slika 5. Kontaktni par blok na disku

Tabela 1. Rezultati eksperimentalnih istraživanja

n (o/min)	μ (-)	F_n (N)						
		5	10	15	20	25	30	35
120	μ_{sr}	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,038	0,038
	μ_{max}	0,041	0,042	0,042	0,041	0,041	0,041	0,042
	μ_{min}	0,035	0,034	0,037	0,036	0,036	0,035	0,034
180	μ_{sr}	0,044	0,043	0,043	0,043	0,043	0,042	0,041
	μ_{max}	0,046	0,047	0,047	0,046	0,046	0,044	0,044
	μ_{min}	0,036	0,036	0,035	0,037	0,036	0,036	0,036
240	μ_{sr}	0,041	0,041	0,041	0,041	0,040	0,040	0,040
	μ_{max}	0,046	0,046	0,045	0,045	0,044	0,043	0,042
	μ_{min}	0,036	0,037	0,037	0,036	0,036	0,037	0,036
300	μ_{sr}	0,045	0,045	0,044	0,043	0,044	0,044	0,043
	μ_{max}	0,047	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
	μ_{min}	0,042	0,042	0,041	0,041	0,042	0,039	0,039
360	μ_{sr}	0,047	0,046	0,046	0,046	0,045	0,046	0,044
	μ_{max}	0,049	0,049	0,048	0,047	0,047	0,047	0,046
	μ_{min}	0,042	0,042	0,044	0,043	0,042	0,042	0,042



Slika 6. Zavisnost srednje aritmetičke vrednosti kinematskog koeficijenta trenja kotrljanja od normalnog opterećenja i broja obrta

Na bazi tabele 1 i slike 6 mogu se izvesti sledeći zaključci:

- za kompletna eksperimentalna ispitivanja srednja aritmetička vrednost srednjih aritmetičkih vrednosti kinematskih koeficijenata trenja iznosi 0,042 sa standardnom devijacijom od 0,003,
- srednje vrednosti kinematskog koeficijenta trenja se kreću u rasponu od 0,038 (minimalna vrednost) do 0,047 (maksimalna vrednost),
- srednje vrednosti kinematskog koeficijenta trenja za pojedine brojeve obrta su približno konstantne vrednosti sa izuzetno blagom tendencijom smanjenja prilikom povećanja normalnog opterećenja,
- srednje vrednosti kinematskog koeficijenta trenja imaju malu tendenciju rasta sa povećanjem broja obrta za identične vrednosti normalnog opterećenja.

4. ZAKLJUČCI

S obzirom na savremene trendove koji se kreću u pravcu izrade i funkcionisanja tribo-mehaničkih sistema bez maziva ili uz njihovu minimalnu upotrebu eksperimentalna istraživanja su sprovedena bez prisustva maziva. Pored visoke cene jedan od osnovnih nedostataka maziva jeste to što predstavljaju opasne materije kako za radnu tako i za životnu sredinu. Kako bi se postigle značajne uštede i prevazišli troškovi kupovine, ali i troškovi prikupljanja i odlaganja maziva u toku i nakon upotrebe, tribo-mehanički sistemi koji funkcionišu bez upotrebe maziva, postaju sve aktuelniji. Tako, na primer, "suva" mašinska obrada dobija sve više na značaju sa razvojem i usavršavanjem prevlaka. Oslojeni elementi imaju znatno bolje karakteristike od neoslojenih, a obradu je moguće izvesti i bez upotrebe maziva - SHP-a.

Rezultati eksperimentalnih istraživanja za kontaktne parove napravljene od čelika C45, i predhodno definisane početne i eksperimentalne uslove, ukazuju da koeficijent trenja kotrljanja kreće oko 0,042. Tokom izvođenja eksperimentalnih ispitivanja koeficijent trenja nije prelazio vrednost od 0,049, a nije ni padoo ispod donje granice od 0,034.

Buduća istraživanja biće usmerena na merenja kinematskog koeficijenta trenja kontaktnih elemenata napravljenih od drugih materijala, sa različitim geometrijskim karakteristikama i pod različitim

eksperimentalnim uslovima (tipovi kontakta, mikroklimatski parametri, brojevi obrta, normalna opterećenja, bez ili sa primenom maziva, itd.). Takođe, u planu je da se izvrši merenje širine i traga habanja na kontaktnim površinama kontaktnih elemenata. Kontakt između bloka i diska ostvaruje se po liniji čija se širina (trag habanja) povećava sa vremenom ostvarivanja kontakta. Primenom adekvatnih merila može se snimiti profil pohabane površine, a promene visine (dubine) površine koja se haba u odnosu na tu referentnu (početnu) predstavlja linijski intenzitet habanja. Na taj način se može dobiti i vizuelna predstava o veličini pohabanog dela kontaktnih elemenata.

5. LITERATURA

- [1] A. Rac, „Osnovi tribologije“, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [2] B. Ivković, „Manufacturing Process Productivity Through Tribology“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 4, No. 1-2, pp.135-138, 1988.
- [3] S. Mitrović, M. Babić, D. Džunić, „Tribološka karakterizacija nanokompozita sa metalnom osnovom“, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2016.
- [4] B. Jeremić, „Tribološki procesi pri dinamičkom opterećenju“, Jugoslovensko Društvo za Tribologiju, Kragujevac, 1997.
- [5] B. Ivković, „Produktivnost i tribologija u industrijskim sistemima“, 8. *International Tribology Conference*, 8.-10. October, Belgrade, pp. 347-350, 2003.
- [6] A. Devaraju, „A review on important factors affecting dry sliding friction“, *Journal of Surface Science and Technology*, Vol. 32, No. 3-4, pp. 73-78, 2016.
- [7] J. Gandra, H. Krohn, R.M. Miranda, P. Vilaca, L. Quintino, J.F. Dos Santos, „Friction surfacing - A review“, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No.5, pp. 1062-1093, 2014.
- [8] K. Holmberg, A. Matthews, „Coatings Tribology, Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering“, Elsevier, 1994.
- [9] J.P. Blau, „The significance and use of the friction coefficient“, *Tribology International*, Vol. 34, pp. 585-91, 2001.
- [10] S. Tanasijević, „Tribološki ispravno konstruisanje“, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2004.
- [11] ASTM G77-17, „Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test“, ASTM International, 2017.

Kratka biografija:



Radenko Blažević rođen je u Banja Luci 1993. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Mašinskog inženjerstva odbranio je 2018. god.

kontakt: blazevicradenko@gmail.com



Đorđe Vukelić rođen je u Novom Sadu 1974. godine. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2010. god., a od 2015 je zvanju vanrednog profesora.