

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

Merjenje trenja in obrabe
Poročilo laboratorijske vaje

Rok oddaje: Ponedeljek, 28. 3. 2016

Uroš R

15. junij 2016

Kazalo

1	Definicija naloge in uvod	3
1.1	Trenje	3
1.1.1	Tipični kontakti z vidika trenja in obrabe	3
1.2	Obraba	3
2	Eksperimentalni del	4
2.1	Opis preizkuševališča	4
2.2	Praktični potek preizkusa	4
2.3	Robni pogoji za eksperiment	4
2.4	Potek koeficienta trenja	4
2.5	Obrabni volumen	5
2.6	Koeficient obrabe	5
2.7	Hertzov kontaktni polmer in maksimalni kontaktni tlak	7
2.8	Rezultati meritev	7
3	Zaključek	8
	Literatura	9

1. Definicija naloge in uvod

1. Na tribološkem recipročnem drsnem preizkuševališču je potrebno izvesti tribološki test obeh obravnavanih maziv,
2. Med potekom testa je potrebno beležiti koeficient trenja in določiti:
 - (a) Ustaljeni koeficient trenja,
 - (b) Obrabni volumen in koeficient obrabe,
 - (c) Za obravnavani kontakt izračunati maksimalni in povprečni Hertzov kontaktni tlak.
3. V zaključku je potrebno dobljene rezultate ovrednotiti in komentirati, pri čemer je potrebno v komentar vključiti:
 - (a) Primerjavo v trenju in obrabe med obema mazivoma,
 - (b) Primerjavo velikosti srednjega premera obrabne kalote s premerom Hertzovega kontakta.

1.1 Trenje

Trenje je pojav, kjer je potrebno v proces dovesti več mehanskega dela, kot ga teoretično nek sistem potrebuje za delovanje. Razlog je v dissipaciji energije zaradi generacije toplote oz. entropije. Splošni model za opis dinamičnega trenja je t.i. koeficient trenja, ki je razmerje med silo trenja pri gibanju in normalno silo na podlago.

$$\mu = \frac{-\vec{F}_{tr} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}| \cdot \vec{F}_R \cdot \vec{n}} \quad (1)$$

Zgornja enačba pove da je trenje nasprotno usmerjeno od smeri gibanja, pri čemer je F_R rezultanta sil na telo. Običajno je koeficient trenja zelo težko eksaktno določljiv, saj je funkcija mnogih spremenljivk (stanje površine, temperatura, par materialov v kontaktu ...)

1.1.1 Tipični kontakti z vidika trenja in obrabe

V elementih, ki služijo kot podpora strojem in so namenjeni gibanju (kotalni, drsni ležaji ipd.) običajno ne želimo trenja niti obrabe. Nizko trenje pa ne nujno implicira nizko obrabo. Tipičen primer so torņa gonila (visoko trenje - zaradi prenosa moči in nizka obraba - življenjska doba). Zavorni sistemi pa so tipični primer naprave, kjer želimo konstanten koeficient trenja ne glede na zunanje pogoje.

1.2 Obraba

Je proces, ki rezultira v zmanjšani ali izgubljeni funkcionalnosti površine ter zmanjšanju mase predmeta. Običajno se obraba pojavi kot razenje materiala in delaminacija ¹. Za opis obrabe se uporabljajo različne tehnike (merjenje mase, profilometrija ...).

Utekanje je proces v katerem se kontaktni površini gladita, pri čemer relativno kratek čas ² koeficient trenja naraste, nato pa se ob konstantnih robnih pogojih delovanja ustali na neki vrednosti.

¹luščenje

²relativno glede na celotno obratovalno dobo

2. Eksperimentalni del

2.1 Opis preizkuševališča

Eksperiment je potekal na recipročnem drsnem preizkuševališču *Cameron - Plint TE-77*, ki preko elektromotorja in ekscentričnega gonila pretvarja rotacijsko gibanje v translatorno gibanje s harmoničnim potekom hitrosti in vršno hitrostjo 0,1 m/s. Obremenitev se vrši mehansko preko nastavljive vzmeti. Merjen parameter je tangencialna sila, ki preko sistema piezoelektričnega zaznavala, nabojnega ojačevalnika in A/D pretvornika pošilja signal v PC. PC preko softverske opreme kontrolira tudi štetje ciklov in prikaz ter zapis meritev.

2.2 Praktični potek preizkusa

1. V vpenjalne čeljusti stroja za preizkušanje vstavimo kroglico in ploščico,
2. temeljito z medicinskim bencinom (alkoholom, acetonom) očistimo drsni površini,
3. na ploščico s pipeto odmerimo 1 ml olja, kjer bosta površini v kontaktu,
4. sestavimo vzvod z bremenom in vpenjalo s kroglico, vendar še ne obremenimo kroglice,
5. prepričamo se o ustreznosti postopka ter preverimo varnostne elemente,
6. poženemo stroj,
7. obremenimo stroj na zeleno obremenitev (150 N).
8. po koncu preizkusa je dobro, da s flomastrom označimo kje se je nahajala kalota preden kaloto analiziramo na mikroskopu.

2.3 Robni pogoji za eksperiment

Merjen je bil koeficient trenja med ploščico in kroglico z oljem 8.

$$F_n = 150 \text{ N}$$

$$n = 7350 \text{ ciklov}$$

$$l = 6,8 \text{ mm}$$

$$f = 7,35 \text{ Hz}$$

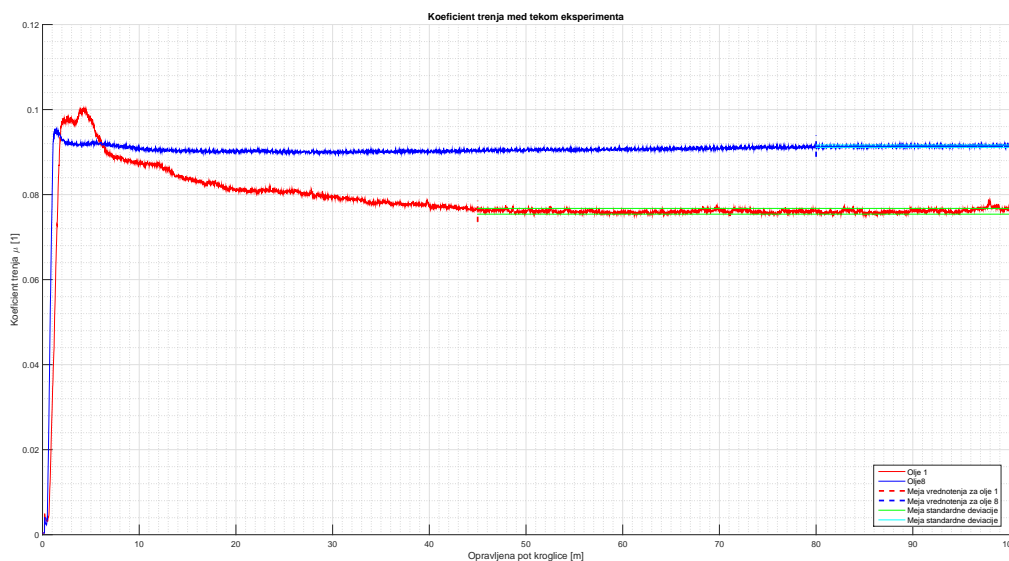
$$l_{cel} = 100 \text{ m}$$

$$R = 5 \text{ mm}$$

2.4 Potek koeficienta trenja

Meritve so bile analizirane preko programske opreme Matlab. Subjektivno je bila določena meja kjer se je koeficient trenja ustalil. Ta meja je pri olju 1 ocenjena od prepotovane razdalje 45 m naprej, pri olju 2 zaradi ocenjenega obstoja prevelikega gradienta koeficienta trenja je ta meja postavljena pri 80 m. Meji sta označeni z debelo modro in rdečo črto.

Od te meje naprej je bila vrednotena merilna negotovost tipa *a* [1], [2] (preko Studentove *t* porazdelitve) številčno predstavljena v poglavju rezultati, grafično pa z dvema linijama blizu posameznih krivulj. Predpostavljeno je bilo, da merilna negotovost tipa *b* ne obstaja [3], [4]. Rezultat je predstavljen na sliki 1.



Slika 1: Predstavitev in obdelava izmerkov

2.5 Obrabni volumen

Manjkajoči parameter d_{sr} je bil določen na mikroskopu, kjer sta se izdelali 2 meritvi. Upoštevana je bila srednja vrednost meritve, računana preko enačbe 2 (podan je izračun za olje 1). Rezultati so prikazani v tabeli 1.

$$d_{sr} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{417.29 + 418.97}{2} = 418,13 \mu\text{m} \quad (2)$$

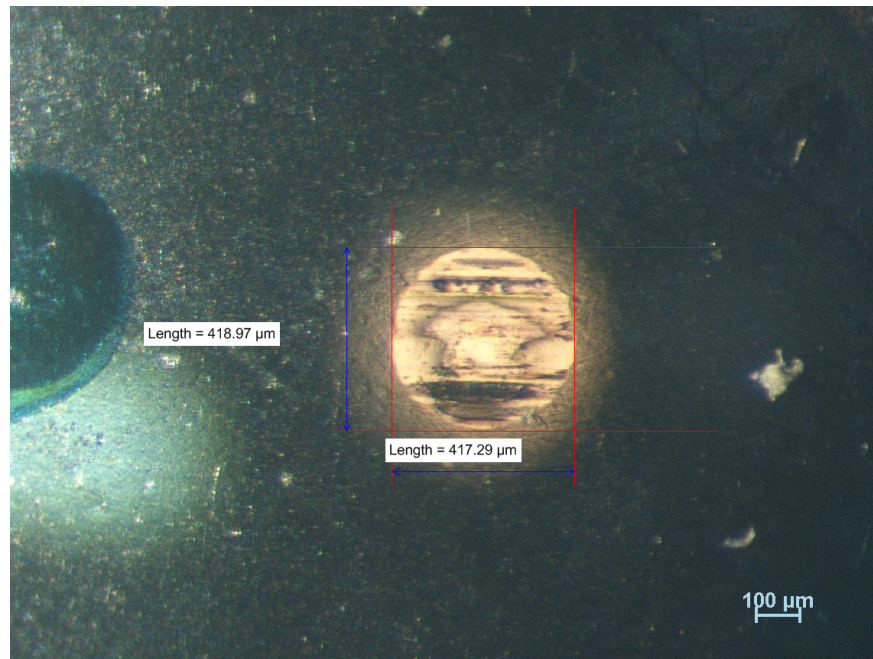
Srednji premer je tako bil upoštevan v enačbi za volumen krogelnega odseka 3 (podan je izračun za olje 1). Meritve so predstavljene na slikah 2 in 3.

$$V_{obr} = \frac{\pi d_{sr}^4}{64 R} = \frac{\pi \cdot 418,13^4}{64 \cdot 5 \cdot 10^3} = 300100 \mu\text{m}^3 \quad (3)$$

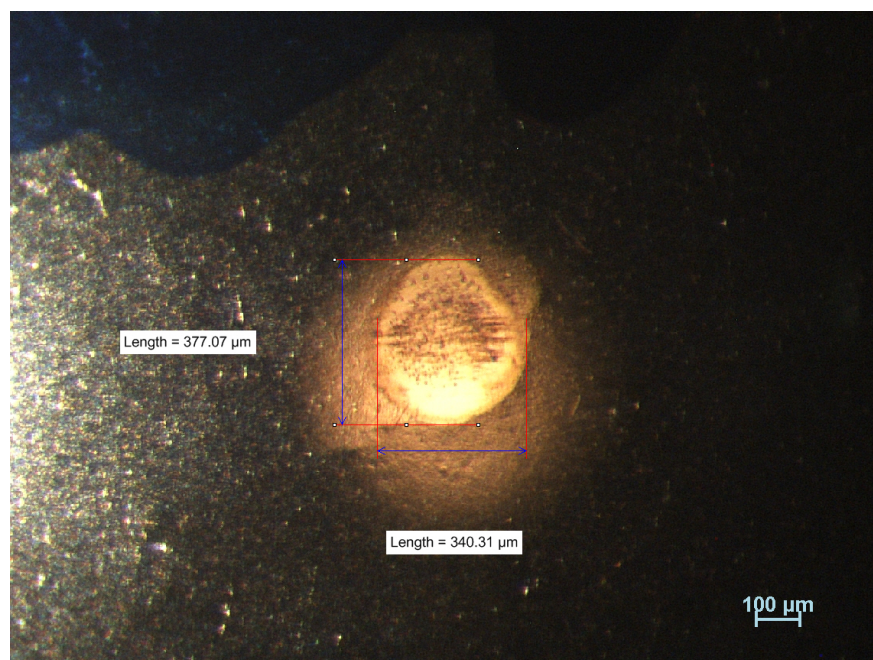
2.6 Koefficient obrabe

Je normalizirana vrednost vseh parametrov z namenom omogočanja primerjave medsebojnih eksperimentov. Definiran je po enačbi 4 (podan je izračun za olje 1).

$$k = \frac{V_{obr}}{F l_{cel}} = \frac{0,00024}{150 \cdot 100} = 2.001 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \quad (4)$$



Slika 2: Obrabna kalota na kroglici za olje 1



Slika 3: Obrabna kalota na kroglici za olje 8

2.7 Hertzov kontaktni polmer in maksimalni kontaktni tlak

Kontaktni polmer je izračunan po enačbah 5 do 7 [5], enačbe izhajajo iz predpostavk navedenih v poglavju 3. Rezultata sta neodvisna od maziva.

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{R}} = 2,5 \text{ mm} \quad (5)$$

$$E' = \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} = \frac{1}{\frac{1-\nu^2}{E}} = \frac{1}{\frac{1-0,3^2}{210 \cdot 10^9}} = 2,3077 \cdot 10^{11} \text{ Pa} \quad (6)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 F_n R'}{E'}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 150 \cdot 0,0025}{2,3077 \cdot 10^{11}}} = 0,000170 \text{ m} = 0,170 \text{ mm} \quad (7)$$

Kontaktni tlak po Hertzovi teoriji znaša

$$p_{sr} = \frac{F_n}{\pi a^2} = \frac{150}{\pi \cdot 0,170^2} = 1660,7 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$p_{max} = \frac{3}{2} p_{sr} = 2491,1 \text{ MPa} \quad (9)$$

2.8 Rezultati meritev

	Olje 1	Olje 8
Srednji premer obrabne kalote [μm]	418,13	358,69
Povprečen ustaljen koeficient trenja in negotovost tipa a za 95%	$0,096 \pm 0,00068$	$0,091 \pm 0,00028$
Obrabni volumen [mm^3]	0.00030	0.00016
Koeficient obrabe [$\text{mm}^3/(\text{Nm})$]	$2,001 \cdot 10^{-8}$	$1,084 \cdot 10^{-8}$
Premer kontakta po Hertzovi teoriji [μm]	170	170
Povprečni tlak v kontaktu po Hertzovi teoriji [MPa]	1660.7	1660.7
Maksimalni tlak v kontaktu po Hertzovi teoriji [MPa]	2491.1	2491.1

Tabela 1: Tabela z zbranimi rezultati

3. Zaključek

Po preizkusu lahko zaključimo, da se je, iz vidika obrabe pri medsebojnem drsenju obravnavanih elementov, bolje obneslo olje 8, saj je obrabna kalota približno 14 % manjša od obrabne kalote olja 1, posledično pa je za polovico manjši tudi obrabni volumen kar implicira tudi za polovico manjši koeficient obrabe. Iz izračunov je možno opaziti tudi manjši koeficient trenja.

Glede na potek utekanja sklepam, da se je večina obrabe drsnih površin z oljem 8 zgodila v prvih nekaj metrih, zatem pa je koeficient trenja po 10. metru opravljene poti ostal relativno konstanten - zaradi rahlega dviganja sem po priporočilih [6] vzel za referenčno vrednost zadnjih 20 m poti. Za olje 1 je možno sklepati, da se je površina utekala dalj časa, opazne pa so bistveno višje fluktuacije koeficienta trenja, najverjetneje gre za vmesno tvorbo raz ter gnetenja obrabnih delcev.

Iz izračunanega sklepam, da mazalni film olja 8 bolje prenaša tovrstno obremenitev najverjetneje zaradi višje viskoznosti (debelejši sloj mazalnega filma - manj potrebnega utekanja) in/ali dodanih aditivov (FM, AW).

Za izračun je bila predlagana [6] Hertzova teorija statičnega dotika dveh teles. Predpostavke na katerih so izpeljane enačbe 5 do 7 so [7], [5]:

1. Površine v stiku so zvezne (brez hrapavosti),
2. Deformacije teles kot celote so zanemarljivo majhne, ³
3. Vsako telo se deformira elastično, ⁴
4. Vsako izmed teles je obravnavno kot pol-prostor, ⁵
5. Trenja med ploskvami ni, ⁶
6. Silske obremenitve so pravokotne na stično ravnino,
7. Telesi sta homogeni in izotropni. ⁷
8. Telesi v stiku sta rotacijsko simetrični, stični kontakt je v obliki kroga.
9. Telesi v stiku glede na njun referenčni okvir (koordinatni sistem) mirujejo.

Iz navedenih predpostavk je mogoče zaključiti, da je primerjava eksperimenta in Hertzove teorije nesmiselna, saj je bilo kršenih preveč predpostavk, da bi lahko trdili, da je eksperiment primerljiv z teorijo (predvsem točke 3, 5 in 9).

³Deformacija v kontaktu ne vpliva na geometrijo telesa - teorija majhnih deformacij

⁴Ker sloni na Hookovi teoriji elastičnih deformacij

⁵Kar pomeni, da zunanje obremenitve (zato da lahko naredimo eksperiment) ne vplivajo na telo

⁶Kar pomeni, da se med deformacijo površine ne "zlepljata" med seboj

⁷Njun Youngov tenzor ima samo 1 komponento - deformacija je neodvisna od smeri obremenitve

Literatura

- [1] BIPM: *JCGM 100:2008*, September, 2008.
- [2] BIPM: *JCGM 200:2012*, September, 2012.
- [3] A. S. I. B. Gregor Bobovnik, Jože Kutin: *Gradivo za vaje pri predmetu Merilna tehnika (3.l RRP)*. Ljubljana, 2013.
- [4] G. M. H. M. I. K. Bronštejn, K. A. Semendjajev: *Matematični priročnik*. Ljubljana: TZS, 2012.
- [5] G. W. Stachowiak: *Engineering tribology*. Butterworth & Heinemann, 2013.
- [6] TINT: *Diapozitivi za vaje pri predmetu tribologija*.
- [7] K. L. Johnson: *Contact mechanics*. Cambridge University Press, 2003.