

**Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo**

**Nosilnost mazalnega filma - 4-ball preizkus
Poročilo laboratorijske vaje**

Rok oddaje: Ponedeljek, 29. 2. 2016

Mentor: dr. Blaž Žugelj

Uroš R

15. junij 2016

Kazalo

1	Uvod	3
2	Definicija naloge	3
3	Osnove teorije aditivov	3
4	Vizualni pregled olja	4
5	Potek preizkusa	4
5.1	Pred testiranjem maziva	4
5.2	Po testiranju maziva	6
6	Meritve - olje 1	7
7	Izračuni	8
7.1	Olje 1	8
7.1.1	Določitev srednjih premerov	8
7.1.2	Modificirana obremenitev	8
7.1.3	Indeks nosilnosti - LWI	9
7.2	Olje 8	10
7.2.1	Srednji premeri kalot	11
7.2.2	Indeks nosilnosti	11
8	Statistična obdelava meritev obrabnih kalot olja 1	13
8.1	Ocena ponovljivosti	13
8.1.1	Ponovljivost kot največja razlika med izmerki	13
8.1.2	Ponovljivost kot standardna deviacija	13
9	Grafi	14
10	Zaključek in ugotovitve	16
	Literatura	18

1. Uvod

Tema te vaje je spoznavanje praktičnega principa določanja indeksa in krivulj nosilnosti za neznano olje z namenom ugotoviti s kakšnim oljem imamo opravka. Dodeljeni sta nam bili olji z oznakama 1 in 8 v ločenih posodicah.

Pri preizkusu želimo kvalitativno popisati razmerje nosilnosti oljnega filma med uporabo, ravnamo se po standardu *ASTM D 2783-83*, ki daje ustrezna navodila ter opozorila za tovrstne preizkuse.

Struktura naloge deljena po poglavjih kronološko kot so bila izvajana - najprej teoretični del, kjer je opisan pomen aditivov v olju osnovni tipi aditivov, sledi praktični preizkus in opis delovnih postopkov pri izvajanju tega preizkusa.

Namen preizkusa kibernetiko pomeni pretvorbo energije in mase v informacije t.j. določitev lastnosti nosilnosti oljnega filma, katerih analiza je zajeta v poglavju meritve, izračuni ter grafi, dodano pa je poglavje o statistični analizi meritev.

2. Definicija naloge

Glavni dogodki preizkusa so:

- Izvesti preizkus nosilnosti filma za neznano olje po navedenem standardu,
- merjenje in opis rezultatov ter zaporedja dogodkov, ki vodijo do rezultatov,
- določitev krivulje in indeksa nosilnosti danega maziva v linearnem in logaritmičnem prostoru,
- komentar in vrednotenje dobljenih rezultatov.

3. Osnove teorije aditivov

Aditivi v mazivih so snovi, ki načrtno omogočajo izboljšanje določenih lastnosti maziv, ki jih želimo (obrabna odpornost, viskoznost ...).

Aditive delimo na 2 veliki skupini:

- Aditivi za zmanjšanje trenja in obrabe,
- aditivi za podaljšanje življenjske dobe (vzdrževanje stanja olja).

Aditive za zmanjšanje trenja in obrabe delimo na tri podskupine, to so

- Aditivi za zmanjšanje trenja (ang. *friction modifiers* - *FM*),
- protiobrabni aditivi (ang. *anti-wear* - *AW*),
- aditivi za visoke obremenitve (ang. *extreme pressure* - *EP*).

Aditivi za zmanjšanje trenja so aditivi, ki so v kontaktu najmanj obstojni. Struktura molekule aditivov je takšna, da je znatna razlika med električnim nabojem ene in druge strani molekule. To pomeni, da se aditiv preko fizikalne vezi (van der Waalove sile) poveže z oksidno plastjo, ki je predhodno prisotna na drsni površini. Tovrstni aditivi so namenjeni majhnim obremenitvam in nižjim temperaturam.

Protiobrabni aditivi se za razliko od modifikatorjev trenja na drsno površino veže s kemijsko vezjo - to pomeni da poteče kemijska reakcija. Tovrstni aditivi so bolj obstojni, vendar pa kemijska reakcija ne more potekati dokler nimajo molekule dovolj visoke notranje energije - temperature ter tlaka. Tipični predstavniki aditivov so spojine s cinkom, borom in fosforjem.

Aditivi za visoke obremenitve so snovi, ki se vežejo neposredno v strukturo materiala in jo obrabno ojačijo, ni pa nujno da dokončno zaustavijo obrabo. To pomeni, da plast spojine maziva in osnovnega materiala lahko razpada naprej, vendar v bistveno upočasnjeni hitrosti (povedano drugače - material lahko razpada zaradi krušenja te spojinske plasti). Tipični predstavniki so spojine z jodom, žveplom in bromom. Zato da tovrstni aditivi sploh začnejo učinkovati so potrebne relativno visoke temperature (tudi nad 150 °C) in visoki tlaki.

Pri običajnih drsnih kontaktih se izredno visoki tlaki pojavljajo v tranzientnih fazah obratovanja ter pri utekanju strojnih delov; takrat je smotrna aplikacija maziv s EP aditivi.

4. Vizualni pregled olja

Meritve so bile izdelane samo na olju z oznako 1, s katerim je bilo možno priti v fizični stik. Značilnosti razbrane iz tega preprostega testa so:

- Olje ima šibak, skoraj nezaznaven vonj,
- je praktično prozoren,
- na otip tvori tenak film,
- pri medsebojnem drgnjenju prstov ne maže preveč dobro, prsti se zatikajo,
- pri počasnem razmikanju prstov olje ne tvori značilne oljne "nitke".

Zgoraj zapisani občutki so zgolj subjektivne narave, z njimi lahko sklepamo na določene tipične značilnosti, ne moremo pa z njih razbrati konkretnih značilnosti. Glede na ugotovljeno pa bi lahko sklepali na sledeče:

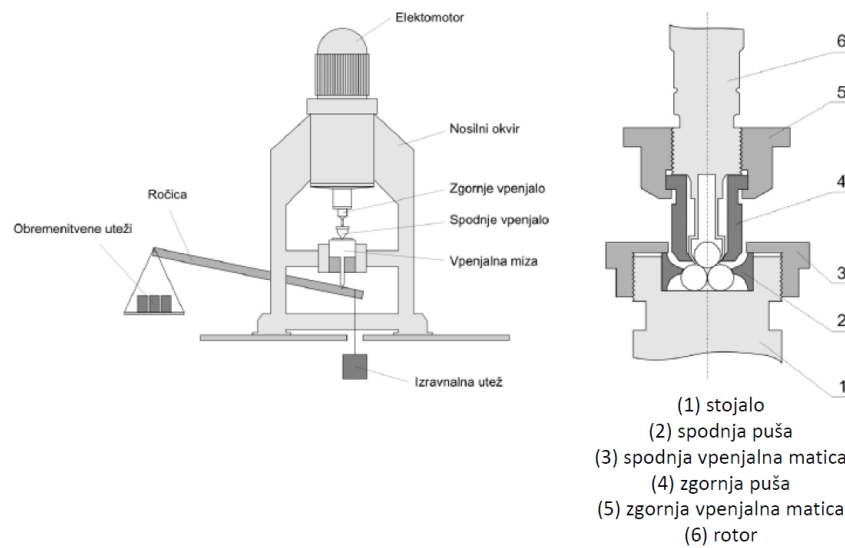
- Olje ima relativno nizko viskoznost (pojav "nitke"),
- olje najverjetneje ni neposredno rastlinskega izvora (vonj),
- olje ni namenjeno mazanju močno udarno obremenjenih delov (majhna površinska napetost - tenak film).

5. Potek preizkusa

Preizkus je potekal z upoštevanjem standarda *ASTM D 2783-83*. V praksi pa si pravilno izveden preizkus sledi po sosledju dogodkov opisanih v poglavjih 5.1 in 5.2. Slika, ki nazorneje opiše stroj je označena z zaporedno številko 1.

5.1 Pred testiranjem maziva

1. Priprava vpenjala (valjasto - koničen jeklen predmet) s tremi fiksnimi kroglicami
 - (a) Grobo **očistimo** vpenjalo - oplaknemo s čistilnim sredstvom (medicinski bencin, alkohol, aceton ...),
 - (b) čvrsto **vpnemo** prijemalo v namizni primež,
 - (c) v odprto vpenjalo **vložimo 3 nepoškodovane** kroglice. Pazimo da jih ne umažemo (prstni odtisi, ostala umazanija ...),
 - (d) **vložimo pušo** za pozicioniranje kroglic (storimo s krožnim gibom),



Slika 1: Shema stroja za preizkušanje nosilnosti filma

- (e) čez pušo **privijemo** pritrdilno **matico** z ustreznim ključem (privijamo dovolj čvrsto, vendar ne preveč; privijamo s sunkovitimi impulzi sile na ključ),
- (f) **dolijemo** zeleno **olje**, tako da so kroglice dobro zalite (≈ 5 mm čez površino kroglic, do oznake), vendar ne pretiravamo s količino olja (da se ne razlija med manevriranjem ter omogoča potopitev še četrte kroglice),
- (g) s pinceto preverimo, da nismo med natakanjem ustvarili **zračne mehurje** - premešamo olje ter nagnemo vpenjalo na vse strani.
2. priprava stroja z rotirajočo kroglico,
- (a) V stroj vstavimo eno, bodisi novo, bodisi enkrat uporabljeno kroglico (kroglica je lahko rabljena pod pogojem, da je bila rabljena kot fiksna kroglica in ima poškodovano relativno majhno, točkasto površino),
- (b) kroglico v stročnico vstavimo tako, da že poškodovana površina - obstoječa obrabna kalota (če je) nikakor ne more priti v stik s površino kjer bo potekal preizkus - najbolje, da poškodovani del obrnemo tako da gleda v stroj,
- (c) pušo rotirajočega dela vstavimo v matico rotirajočega dela, ta sestav pa privijemo na gred stroja za preizkušanje po sledečem postopku:
- i. **Fiksiramo gred** stroja z nosilcem za blokiranje,
 - ii. matico z ustreznim ključem ter nekaj sunki ključa privijemo na gred stroja.
- (d) dodatnih grel olja ne potrebujemo (električne sponke ostanejo proste), pazimo da so sponke obrnjene stran od ključa.
3. sestav vpenjala fiksnih kroglic torzijsko fiksiramo z namensko integriranim viličastim ključem, pri čemer je postopek montaže sledeč:
- (a) Iz ključa odstranimo varovalko - žebliček,
 - (b) ključ nastavimo na vpenjalo fiksnih kroglic,
 - (c) **varovalko vstavimo nazaj** v ključ,

- (d) namen varovalke je omejitev translacijskega gibanja ključa pri vibracijah preizkušancev.
4. na vzvod, ki je povezan s strojem obesimo ustrezno obremenitveno maso. Pri tem pazimo, da je izpolnjeno sledeče:
- (a) Najprej nastavimo maso s košaro na mizi (pretvorbene tabele, ki so posledica uporabe vzvoda, visijo ob stroju [3, 395 kg \equiv 80 kg]),
 - (b) ne pozabimo na **kalibracijsko maso** (manjši kvader),
 - (c) košaro obesimo na zato namenjeno mesto na daljšem koncu vzvoda, pri čemer posebej pazimo na lastno **varnost**,
 - (d) **zaustavimo morebitno nihanje**.
5. **preverimo, če lahko med obratovanjem pride do katastrofalnega stanja**, to pomeni:
- (a) Preverimo da so viličasti ključ, varovalka in fiksno vpenjalo pravilno vstavljeni,
 - (b) preverimo, da je masa dobro vpeta,
 - (c) ohlapna oblačila, ne-speti dolgi lasje ipd. ne sodijo k stroju,
 - (d) so prisotni varnostni elementi - varovalke, hitroizklopna stikala idr. ter da delujejo oz. so vključeni.
6. vrtilno frekvenco elektromotorja nastavimo na $1760 \pm 40 \frac{\text{vrt}}{\text{min}}$,
7. celoten čas trajanja preizkusa je $10 \pm 0,2$ s,
8. preizkus naj poteka pri temperaturi od 18,3 do 35 °C
9. stroj zaženemo,
10. med zagonom skrbimo da sistem z vzvodom in utežmi ne preide v resonančno stanje - ustrezno dušimo z rahlim naslonom prsta ob košaro.

5.2 Po testiranju maziva

Po koncu preizkušanja je postopek sledeč:

1. Prepričamo se da se stroj **ne more samodejno vključiti**,
2. z vzvoda odstranimo obremenitvene mase,
3. demontiramo integrirani viličasti ključ z varovalko,
4. s stroja odstranimo vpenjalo za fiksne kroglice,
 - (a) Iz vpenjala **odlijemo olje v ustrezno posodo**,
 - (b) vpenjalo grobo obrišemo z ustreznimi krpami,
 - (c) vpenjalo **fino očistimo** z ustreznim topilom (medicinski bencin, alkohol, aceton),
 - (d) vpenjalo vpenemo v primež,
 - (e) odvijemo matico (z več sunki momenta),
 - (f) odstranimo pušo (z krožnim gibom),
 - (g) odstranimo kroglice ter jih **še enkrat dobro očistimo** - razmastimo,
 - (h) **shranimo** kroglice v poseben shranjevalni regal, tako da se ne morejo pomešati med ostale,
 - (i) pripravimo vpenjalo na nov preizkus - ponovno čiščenje.

5. s stroja odstranimo vpenjalo z rotirajočo kroglico po sledečem postopku:
 - (a) Gred stroja torzijsko fiksiramo,
 - (b) z ustreznim ključem in več sunki momenta odvijemo matico z vretena,
 - (c) kroglico, ki je rotirala **zavržemo**, saj je neuporabna.
6. analiziramo kroglice, ki se niso vrtele
 - (a) Kroglice eno po eno analiziramo pod mikroskopom z ustrežno povečavo ter merilnim sistemom, ki omogoča merjenje razdalj,
 - (b) pri merjenju pazimo od **kje do kje merimo** (merimo največji in najmanjši premer), namreč lahko se pojavi skupek zlepljenega materiala na robu obrabne kalote - tega ne smemo upoštevati,
 - (c) zapišemo si po dve dimenziji na merilni list - postopek opisan v poglavju 6.
7. po meritvi kroglice bodisi zavržemo, bodisi shranimo za naslednji preizkus kjer bodo te kroglice imele vlogo vrteče se kroglice.

Za nov test kot fiksne kroglice vstavimo vedno vstavimo nove, nepoškodovane kroglice, po vsakem testu tudi povečamo obremenitveno maso - razen če prejšnji preizkus ni spodletel (prekinitev napajanja ...). Obremenitev povečujemo do zvara kroglic, saj vsako nadaljnje povečevanje obremenitve vodi le do hitrejšega zvara.

6. Meritve - olje 1

Po preizkusu se kroglice prenesejo na mikroskop, kjer se izmeri premer največji in najmanjši premer obrabne kalote posamezne kroglice. Dobljeni izmerki so razvrščeni v tabelah 1 in 2.

Zaporedna številka j	d_1^j [μm]	d_2^j [μm]	Obremenitvena masa [kg]
1	2586	2595	80
2	2238	2436	80
3	2354	2496	80

Tabela 1: Vrednosti izmerkov premerov kalote za obremenitev 80 kg za olje 1

Zaporedna številka j	d_1^j [μm]	d_2^j [μm]	Obremenitvena masa [kg]
1	2792	2737	100
2	2925	2823	100
3	2848	2879	100

Tabela 2: Vrednosti izmerkov premerov kalote za obremenitev 100 kg za olje 1

Vrednosti pri večji obremenitveni masi (t.j. 126 kg) niso bile določljive, saj je prišlo do zavaritve.

7. Izračuni

Obrabna kalota je običajno neokrogla oblike, standard določa, da je prava mera aritmetična srednja vrednost premera obrabne kalote \bar{d} vseh treh kroglic:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{j=1; i=1}^{3;2} d_i^j}{ij} \quad (1)$$

Indeks j predstavlja številko posamezne kroglice - vseh kroglic v seriji je 3, indeks i pa predstavlja posamezen premer. Ko $i = 1$ pomeni to najmanjši premer kalote videne pod mikroskopom, ko $i = 2$ pa je ta premer največji možni premer viden pod mikroskopom (zopet pazimo na morebiti narinjen material).

Bolj konkretno to pomeni pri treh kroglicah in 2 izmerkih na kroglico:

$$\bar{d} = \frac{d_1^1 + d_2^1 + d_1^2 + d_2^2 + d_1^3 + d_2^3}{6} \quad (2)$$

7.1 Olje 1

7.1.1 Določitev srednjih premerov

Povprečni premer kroglice za grupo z obremenitvijo 80 kg je sledeč:

$$\bar{d} = \frac{2586 + 2595 + 2238 + 2436 + 2354 + 2496}{6} = 2451 \mu\text{m} \quad (3)$$

Preko pretvorbe iz μm v mm je rezultat torej 2,451 mm. Ta rezultat vnesemo v ustrezno tabelo, t.j. tabela na sliki 2.

Podobno kot za obremenitev 80 kg izvedemo postopek za 100 kg, zaradi preglednosti sta rezultata vnesena v tabelo 3.

Obremenitvena masa [kg]	Povprečen premer \bar{d} [mm]
80	2,451
100	2,834
126	Popolna zavaritev

Tabela 3: Vrednosti izračunov povprečnih premerov kalote

Preko teh vrednosti in podpore standarda lahko izračunamo indeks nosilnosti. Standard narekuje da potrebujemo 10 meritev; če jih ne izvedemo 10 podatke prepisemo iz rubrike nadomestni premer kalote ¹ za vse predhodnike preden so se preizkušane kroglice zvarile. Te celice v stolpcu nadomestni premer kalote prepisemo tudi za tiste meritve katere za seboj niso pustile obrabne kalote. Bistvenega pomena je, da je vseh meritev 10. Vkolikor se kroglice zvarijo se poskus ne šteje kot uspešna meritev.

7.1.2 Modificirana obremenitev

Popravljen (modificirano) obremenitev izračunamo preko tabele na sliki 2, kjer so zbrani tudi vsi podatki². Za primer 100 kg obtežbe je popravljen (modificirano) obremenitev določljiva po sledeči enačbi:

$$m_{mod_{100 \text{ kg}}} = \frac{(LD_h)_{100 \text{ kg}}}{X_{100 \text{ kg}}} = \frac{40,5}{2,834} = 14,291 \text{ kg} \quad (4)$$

¹ang. *Compensation scar diameter*

²Tabela je povzeta po standardu, ki tudi narekuje vrednosti za korekcijo

7.1.3 Indeks nosilnosti - LWI

Indeks nosilnosti LWI³ izračunamo preko enačbe 5:

$$LWI_1 = \frac{\sum_{i=1}^{10} \frac{(LD_n)_i}{X_i}}{10} = \frac{11,609 + 14,080 + 17,556 + 21,607 + 28,613 + 36,242 + 44,722 + 56,051 + 12,273 + 14,291}{10} = 25,70 \text{ kg} \quad (5)$$

LWI za olje 1 torej znaša 25,70 kg

Preko posameznih premerov vtiskov ter ustreznih obremenitev pa lahko izrišemo krivuljo nosilnosti, prikazano v poglavju 9.

³Load Wear Indeks

MERILNI LIST ZA "FOUR BALL" TEST – EP (ASTM)

Šifra vzorca: _____ List/Listov: 1/1

Mesto opravljanja analize: LAB TINT

Datum prejema vzorca: 22.2.2016 Vrsta naročila: ANALIZA NOSILNOSTI

Vrsta olja: OLJE 1

REZULTATI:

"Four Ball" test – EP opravljen po standardu

ASTM D 2783 - 82

ASTM D 2596 - 87

Št. testa: <u>22022016-1</u>		Standardni preskus ASTM D 2783; D 2596			
Datum: <u>22.2.2016</u>		Čas pos. preskusa.: 10 s			
Olje / Mast: <u>OLJE 1</u>		Št. vrtljajev: 1760 min ⁻¹			
		Temperatura: <u>SD</u> / 65°C / 75°C /			
Normalna obrem. (kg) L	Obremenitev na ročici (kg) Q	Izmer. premer kalote (mm) X	Nad. premer kalote (mm)	L*Dh faktor	Popravljen obremenitev (kg) L*Dh / X
6	0,254	/		0,95	
8	0,339	/		1,40	
10	0,424	/	0,21	1,88	
13	0,551	<u>0,23</u>	0,23	2,67	<u>11,609</u>
16	0,678	<u>0,25</u>	0,25	3,52	<u>14,080</u>
20	0,848	<u>0,27</u>	0,27	4,74	<u>17,556</u>
24	1,018	<u>0,28</u>	0,28	6,05	<u>21,607</u>
32	1,357	<u>0,31</u>	0,31	8,87	<u>28,613</u>
40	1,696	<u>0,33</u>	0,33	11,96	<u>36,242</u>
50	2,120	<u>0,36</u>	0,36	16,10	<u>44,722</u>
63	2,671	<u>0,39</u>	0,39	21,86	<u>56,051</u>
80	3,395	<u>2,451</u>	0,42	30,08	<u>12,273</u>
100	4,240	<u>2,834</u>	0,46	40,5	<u>14,291</u>
126	5,345	/	0,50	55,2	
160	6,787	/	0,54	75,8	
200	8,485	/	0,59	102,2	
250	10,609	/		137,5	
315	13,368	/		187,1	
400	16,975	/		258	
500	20,219	/		347	
620	25,311	/		462	
800	33,950	/		649	
Opombe					Σ 257,044
Rezultat: LWI (kg) = Σ/10 = <u>25,70 kg</u>					
Datum: <u>22.2.2016</u>		Preskus opravil: _____			

Vse izračune, vmesne meritve, diagrame ali fotografije v zvezi s to analizo vnesite pod rubriko opombe oz. jih priložite merilnemu listu kot prilogo.

Slika 2: Merilni list za olje 1

7.2 Olje 8

Podobno kot smo že naredili za olje 1 naredimo še za olje 8. Razlika od prej je, da so posamezne meritve že bile predhodno opravljene.

7.2.1 Srednji premeri kalot

Izmerki (že izračunani srednji premeri) se nahajajo v tabeli 4.

Obremenitvena masa [kg]	Povprečen premer \bar{d} [mm]
80	Nezaznavna obraba
100	1,94
126	2,13
160	2,68
200	Popolna zavaritev

Tabela 4: Vrednosti izračunov povprečnih premerov kalote za olje 8

Da ne ponavljamo posameznih preračunov, ker so postopkovno enaki, kot v poglavju 7.1 (srednji premeri \Rightarrow modificirane obremenitvene mase \Rightarrow indeks nosilnosti), zgolj navedimo dobljene vrednosti v tabeli na sliki 3. Preko posameznih premerov vtiskov ter ustreznih obremenitev pa lahko izrišemo krivuljo nosilnosti, prikazano v poglavju 9.

7.2.2 Indeks nosilnosti

LWI za olje 8 po izračunu znaša 35,15 kg

MERILNI LIST ZA "FOUR BALL" TEST – EP (ASTM)

Sifra vzorca: _____ List/Listov: 1/1
 Mesto opravljanja analize: LAB TINT
 Datum prejema vzorca: 22.2.2016 Vrsta naročila: ANALIZA NOSILNOSTI
 Vrsta olja: OLJE 8

REZULTATI:

"Four Ball" test – EP opravljen po standardu

ASTM D 2783 - 82

ASTM D 2596 - 87

St. testa: <u>22022016-8</u>		Standardni preskus ASTM D 2783: D 2596			
Datum: <u>22.2.2016</u>		Čas pos. preskusa: 10 s			
Olje / Mast: <u>OLJE 8</u>		Št. vrtljajev: 1760 min ⁻¹			
		Temperatura: <input checked="" type="checkbox"/> 65°C / 75°C /			
Normalna obrem. (kg) L	Obremenitev na ročici (kg) Q	Izmer. premer kalote (mm) X	Nad. premer kalote (mm)	L*Dh faktor	Popravljen obremenitev (kg) L*Dh / X
6	0,254	/		0,95	
8	0,339	/		1,40	
10	0,424	/	0,21	1,88	
13	0,551	/	0,23	2,67	
16	0,678	/	0,25	3,52	
20	0,848	<u>0,27</u>	0,27	4,74	<u>17,556</u>
24	1,018	<u>0,28</u>	0,28	6,05	<u>21,607</u>
32	1,357	<u>0,31</u>	0,31	8,87	<u>28,613</u>
40	1,696	<u>0,33</u>	0,33	11,96	<u>36,242</u>
50	2,120	<u>0,36</u>	0,36	16,10	<u>44,722</u>
63	2,671	<u>0,39</u>	0,39	21,86	<u>56,051</u>
80	3,395	<u>0,42</u>	0,42	30,08	<u>71,619</u>
100	4,240	<u>1,34</u>	0,46	40,5	<u>20,896</u>
126	5,345	<u>2,13</u>	0,50	55,2	<u>25,315</u>
160	6,787	<u>2,68</u>	0,54	75,8	<u>28,283</u>
200	8,485	/	0,59	102,2	
250	10,609	/		137,5	
315	13,368	/		187,1	
400	16,975	/		258	
500	20,219	/		347	
620	25,311	/		462	
800	33,950	/		649	
Opombe					Σ <u>351,486</u>
Rezultat: LWI (kg) = $\Sigma/10 =$ <u>35,15 kg</u>					

Datum: 22.2.2016 Preskus opravil: _____

Vse izračune, vmesne meritve, diagrame ali fotografije v zvezi s to analizo vnesite pod rubriko opombe oz. jih priložite merilnemu listu kot prilogo.

Slika 3: Tabela izračunov za olje 8

8. Statistična obdelava meritev obrabnih kalot olja 1

To poglavje je bilo dodatno vpeljeno zaradi bolj podrobne analize ponovljivosti izmerjenih veličin. S tem namenom vpeljemo pojme kot so standardna deviacija in normalna porazdelitev gostote verjetnosti. Prva je definirana z enačbo [1]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (6)$$

Dodatno definirajmo srednjo vrednost kot:

$$\mu = \frac{\sum_{k=1}^n d_k}{n} \quad (7)$$

Izbrali smo Studentovo standardno deviacijo - standardno deviacijo vzorca, x pomeni posamezen izmerk. Skupaj s srednjo aritmetično vrednostjo μ pa lahko definiramo normalno porazdelitev gostote verjetnosti z enačbo:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (8)$$

8.1 Ocena ponovljivosti

Zato, da lahko kvantitativno popišemo ponovljivost moramo predpostaviti, da je kalota popolnoma okrogle oblike. Razlogov za tako dejanje je več

- Ni bilo zapisano katera meritev je vzdolž, katera pa prečno na smer odnašanja materiala,
- pozicioniranje kalote pod mikroskop ni bila vedno enolična.

Ob tej predpostavki lahko ponovljivost zapišemo kot največjo razliko med vzorcem izmerkov ali izračunamo pripadajoče standardne deviacije [2].

8.1.1 Ponovljivost kot največja razlika med izmerki

Ponovljivost ocenimo kot največjo razliko med izmerki, saj je izmerkov relativno malo.

$$P = d_{max} - d_{min} \quad (9)$$

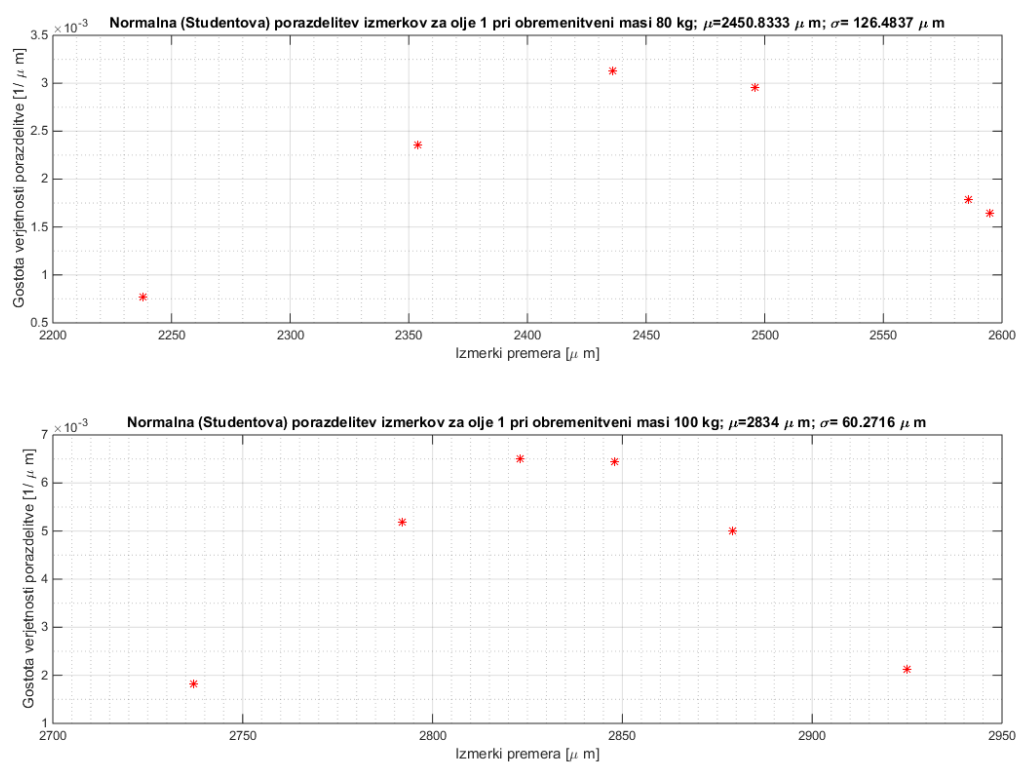
Preko enačbe 9 lahko izračunamo, da ponovljivost pri obremenitveni masi 80 kg znaša 357 μm , pri obremenitveni masi 100 kg pa 188 μm .

8.1.2 Ponovljivost kot standardna deviacija

Ponovljivost merjenja lahko zapišemo ter izrazimo s standardno deviacijo vzorca, ter izrišemo pripadajoče krivulje gostote porazdelitve verjetnosti ⁴. Iz enačbe 6 in 7 sklepamo, da se nahajajo meritve na intervalu $d_{80} \in [2324.4, 2577.36] \mu m$ z verjetnostjo 63,2% pri obremenitveni masi 80 kg, ter $d_{100} \in [2773.73, 2894.27] \mu m$ z verjetnostjo 63,2% pri obremenitveni masi 100 kg.

Torej ponovljivost pri obremenitveni masi 80 kg znaša 126,48 μm in 60,27 μm pri 100 kg. Gostoto porazdelitve verjetnosti prikazuje slika 4.

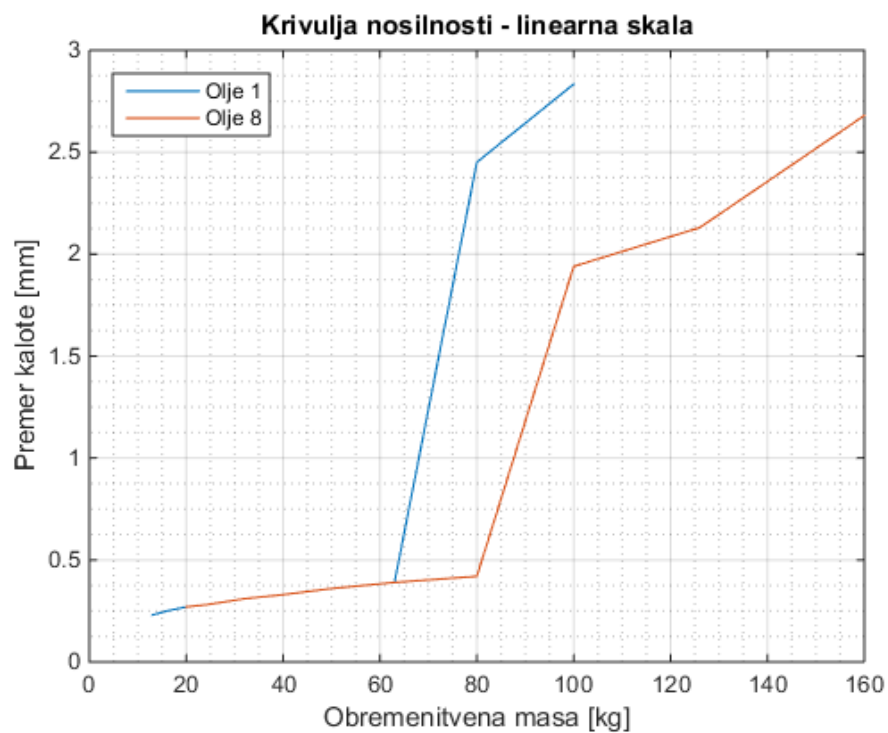
⁴Probability density function - PDF



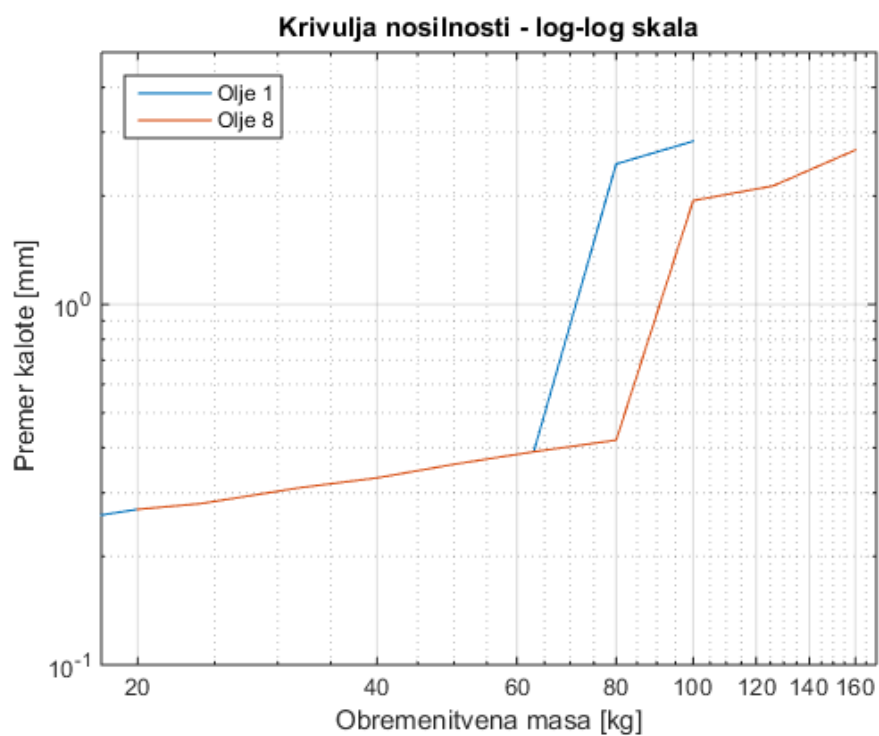
Slika 4: Točke gostote porazdelitve verjetnosti (PDF) za izmerke

9. Grafi

Grafe krivulj nosilnosti v linearnem in logaritmičnem prostoru prikazujeta sliki 5 in 6.



Slika 5: Primerjava krivulj olj v linearnem prostoru



Slika 6: Primerjava krivulj nosilnosti v logaritmičnem prostoru

10. Zaključek in ugotovitve

Cilj te naloge je bil ugotoviti prisotnost aditivov proti obrabi. Opazimo, da imata obe olji do neke meje relativno položno katakteristiko nosilnosti. Ta meja je pri olju 1 določena z obremenitveno maso 63 kg, pri olju 2 pa 80 kg. Ta meja predstavlja obremenitveno maso, pri kateri izmerki premera kalote ne odstopajo več kot 5% od t.i. kompenzacijske linije. To področje pomeni, da olje dovolj dobro maže - tvori film, ki omogoča separacijo dveh teles za katere obstaja relativna hitrost različna od 0 - rotirajoče in stacionarne kroglice.

Za tem področjem sledi področje preboja filma, mazanje je še vedno prisotno vendar se telesi medsebojno drgneta, to pomeni, da je trenje mešano (suho-mazano). Značilen je povišan gradient povečevanja premera kalote z povečevanjem obremenitvene mase.

Po področju začetnega preboja oljnega filma sledi področje takojšnjega preboja filma ter odpovedi aditivov v olju (če so). Značilni za to področje je:

1. Visoka dissipacija energije zaradi trenja,
2. hude poškodbe drsnih površin,
3. torna zavaritev površin,
4. vžig olja.

Pri gradnji strojev je seveda to področje popolnoma neželeno, saj vodi do popolnega uničenja ⁵ geometrije drsnih površin in okoliške strukture materiala.

Iz meritev je razvidno da ima olje 1 precej nižji indeks nosilnosti⁶ od olja s številko 8 ⁷. Glede na te podatke sklepam, da ima olje 1 slabšo sposobnost mazanja od olja 8, zato menim, da ima olje 8 v primerjavi z oljem 1 dodane določene protiobrabne aditive, enako sliko nam pove tudi analiza premera obrabnih kalot, pri obremenitveni masi 100 kg imajo kroglice 1,46-krat večji premer od kroglic mazanih z oljem 8. Gotovo pa imajo na nosilnost filma tudi vpliv drugi parametri, kot npr. viskoznost olja.

Za boljšo predstavo rezultatov navedimo v tabeli neka j testov za komercialno dostopna olja [3], [4]

Olje	LWI
Bazno olje 600 N	56,52
Bazno olje 600 N + 0,05% MoS ₂	84,30
Bazno olje 600 N + 0,1% MoS ₂	63,32
GM Synthetic Axle 75W-90	72,29
Lucas 75/90 Synthetic	69,43
Valvoline SynPower 75W-90	66,74
Mobil 1 Synthetic 75W-90	65,72
Castrol SYNTEC 75W-90	63,14
Castrol Hypoy C 80W-90	55,08
Pennzoil Synthetic 75W-90	44,54

Tabela 5: LWI za nekatera tržno dostopna olja

Glede na LWI tržno dostopnih maziv lahko ugotovimo, da imata tako olje 1 kot olje 8 relativno majhno stopnjo nosilnosti filma. Seveda pa za celovito oceno določenega olja ne smemo posegati samo po tem preizkusu.

⁵Razen, ko je to zeleno - npr. torno varjenje

⁶LWI = 25,70 kg

⁷LWI = 35,15 kg

Med preizkusom olja 1 smo ob obremenitveni masi 80 kg zaslišali močno cviljenje kroglic, ki je potekalo čez celoten del preizkusa. To cviljenje nakazuje, da je obremenitev previsoka da bi oljni film zdržal, vendar pa hkrati dovolj nizka, da ni prišlo do zavaritve. Pri meritvi z obremenitveno maso 126 kg je cviljenje bilo prisotno zgolj ob začetku preizkusa, kasneje pa je prenehalo. Razlog za pojav je, da se je material kroglic že pričel mehčati - kroglice so se pogrezale ena v drugo, ob končani meritvi pa so bile kroglice zvarjene, to smo lahko tudi zaslišali ob koncu rotacije - tenak klik.

Literatura

- [1] G. M. H. M. I. K. Bronštejn, K. A. Semendjajev: *Matematični priročnik*. Ljubljana: TZS, 2012.
- [2] A. S. I. B. Gregor Bobovnik, Jože Kutin: *Gradivo za vaje pri predmetu Merilna tehnika (3.l RRP)*. Ljubljana, 2013.
- [3] K. L. D. Dave E. Leitten: *A study of automotive gear lubes*, Dostopno na <http://www.lastgreatroadtrip.com/wp-content/uploads/2010/11/gear-oil-comparison.pdf>.
- [4] M. A. E. S. J. V. Srinivas, Ch. Kodanda Rama Rao: *Extreme pressure properties of 600 N Base oil dispersed with molybdenum disulphide nano particles*. Universal journal of mechanical engineering.
- [5] TINT: *Diapozitivi za vaje pri predmetu tribologija*.
- [6] ASTM: *ASTM D 2783 - 83*, Januar 1983.