

## Primerjava triboloških lastnosti mineralnih in repičnih mazalnih olj - Osnove, načini preskušanja ter izbira preskusnih olj (1. del)

### Tribological Properties of Rapeseed Oils Compared to Mineral Oils - Basics, Test Methods and Test Oil Selection (part 1)

Jože Vižintin - Aleš Arnšek

*V raziskavi smo predstavili naprave in metode, ki smo jih uporabili za določitev mehanskih in fizikalno-kemijskih lastnosti olj na osnovi oljne repice (oljne ogrščice). Naprave in metode so bile primerjalno uporabljene tudi za izbrano olje na mineralni osnovi. Mehanske lastnosti smo preskušali na visokofrekvenčni napravi za merjenje trenja in obrabe (SRV) in preskuševališču FZG. Opisali smo tudi postopek izbire in lastnosti preskusnih mazalnih olj.*

*Rezultat so izbrana olja na osnovi oljne repice, ki imajo primerljive viskoznosti pri začetni delovni temperaturi preskusov z olji na mineralni osnovi. Izbrana repična olja se sicer razlikujejo po gradaciji ISO s primerjanim mineralnim oljem.*

© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: olja repična, SRV, FZG)**

*In the study, the test equipment and the methods for determination of the mechanical, physical and chemical properties of rapeseed-based oils are introduced. The same equipment and methods were already used for testing the selected mineral-based oil. The mechanical properties were performed on a high-frequency test device for friction and wear measurement (SRV) and FZG test rig. The oil selection procedure and the properties of tested oils are also described.*

*The results are selected rapeseed oils with the same viscosity at a starting working temperature as a corresponding mineral-based oil of a higher ISO grade.*

© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: rapeseed oil, lubrication properties, SRV, FZG)**

#### 0 UVOD

V zadnjih letih je uporaba biološko razgradljivih maziv v zaščitnih področjih dosegla precejšen razmah. Onesnaževanje tal in vodnih virov z mineralnimi mazivi, bodisi zaradi človeške malomarnosti, neustreznih konstrukcijskih rešitev ali nepričakovanih razlitij je postal pereč problem v razvitih, še bolj pa nerazvitih področjih sveta.

Dandanes so vprašanja strupenosti in biološke razgradljivosti vse pomembnejša tudi v proizvodnji maziv. Mineralna maziva so težko razgradljiva in strupena, onesnaževanje tal in vodnih virov z mazivi pa povzroča resne ekološke probleme. Najbolj okolju neprijazna maziva so: maziva za dvotaktne motorje, verige gozdarskih žag in vsa druga maziva, ki se po uporabi nenadzorovano odložijo v naravno okolje. Ekološko problematična

pa so tudi hidravlična in reduktorska olja za gradbeno, kmetijsko, živilsko, gozdarsko in rudarsko mehanizacijo, ker že najmanjši izpust mineralnega olja v okolje povzroči nepopravljivo škodo.

Od celotne količine prodanih maziv v Sloveniji (ocena je do 20.000 ton), jih kot izrabljeno mazivo zberemo le 10 odstotkov. Dejstvo je, da lahko en liter razlitega motornega olja onesnaži milijon litrov pitne vode. En liter motornega olja pa naredi madež velikosti enega hektarja na mirujoči vodni površini [1].

Hitro razgradljive in nestrupene kapljevine so rastlinska olja. Rastlinska olja so v primerjavi z mineralnimi olji dobro biološko razgradljiva, nestrupena in pridobljena iz obnovljive surovine. Vsa rastlinska olja niso primerna za uporabo kot (industrijska) maziva. Imeti morajo določene tribološke lastnosti, kakor so: dobra mazalnost, visoko vrelišče in plamenišče, protikorozijska zaščita, dobre tribološke

lastnosti pri nizkih temperaturah (pod 0°C) ter zadovoljiva oksidacijska in hidrolitična stabilnost. Te lastnosti ima olje iz oljne repice (oljne ogrščice ali repično olje). Poleg tega je proizvodnja repičnega olja gospodarno sprejemljiva.

Iz literature ([1] do [23]) je razvidno, da je največ raziskav triboloških lastnosti s področja biološko razgradljivih repičnih olj v svetu usmerjenih v iskanje načina preprečevanja hitre oksidacije in hidrolize. Že samo dejstvo, da imajo ta olja dobre mazalne lastnosti zaradi sestave osnovnega olja in s tem povezane fizikalne oz. kemijske adsorpcije maščobnih kislin na kovinsko površino, je bil razlog za našo raziskavo.

V pričujočem prispevku bomo prikazali mehansko-dinamične lastnosti treh, na trgu dosegljivih reduktorskih olj na osnovi oljne repice, s poudarkom na zajedanju, jamičenju in normalni abrazivni obrabi. Med preskušanjem smo spremljali spremembe fizikano-kemijskih lastnosti olj in proces oksidacije. Tako dobljene rezultate smo primerjali z rezultati reduktorskega olja na mineralni osnovi.

## 1 SPLOŠNO O PRESKUŠANJU

Vse naprave, standardi in postopki, ki jih imamo na voljo, so izdelani za preskušanje mazalnih lastnosti olj na mineralni osnovi. Vendar jih raziskovalci uporabljamo za preskušanje obeh vrst olj. Razlog je v tem, da mora vsako mazalno olje ustrezati enakim merilom ne glede na vir. V nadaljevanju bomo s primerjanjem izmerjenih rezultatov poskušali prikazati, v kolikšni meri so izmerjeni rezultati zanesljivi, če uporabimo sedanje preskusne možnosti tudi za olja, izdelana iz oljne repice.

Za ugotavljanje mehansko-dinamičnih mazalnih lastnosti olj merimo koeficient trenja pri različnih tlakih, preprečevanje obrabe pri majhnih drsnih hitrostih in visokih tlakih ter delež preprečevanja zajedanja in jamičenja. Med uporabo se spreminjajo tudi fizikalno-kemijske lastnosti olj, predvsem viskoznost in relativni delež kislih spojin - numerična vrednost nevtralizacijskega števila. Poleg teh dveh parametrov ugotavljamo z metodo infra rdeče spektroskopije še izrabo aditivov, oksidacijo maziva in spremembo sestave maziva ([24] do [26]).

Strižna napetost v kontaktu, ki je posledica trenja, povzroča z izmeničnim delovanjem utrujanje površine in s tem mikro in makro jamičenje. Trenje v tribološkem kontaktu se v celoti spreminja v tornu toploto. Olje nastalo toploto delno odvede v okolico, ostanek toplote pa segreva olje in druge elemente v kontaktu. Povišana temperatura olja povzroči spremembo mazalnih lastnosti in nosilnost mazalnega olja. Obe spremembi se kažeta v povečanem številu prekinitve oljne plasti, ki se v tribološkem kontaktu kaže v povečani obrabi in zajedanju ([23], [25] in [27]).

Zajedanje in jamičenje sta tipični poškodbi zobnih bokov in kotalnih površin v ležajih. Pri velikih hitrostih ali visokih tlakih oziroma pri kombinaciji obeh običajno pride do zajedanja. Prvenstvena naloga maziva je, da prepreči zajedanje med drsnima površinama z vzpostavitvijo dovolj debele mazalne plasti ali pa z vzpostavitvijo nizko strižnih plasti reakcijskih ostankov aditivov AW (protiobrabni) in EP (za visoke tlake).

Jamičenje je posledica utrujanja materiala v kotalno-drsnih kontaktih. Ponavljajoča se površinska napetost povzroči razpoke na površini ali v materialu, ki se nato širijo po načelu mehanike loma do nastanka poškodbe - jamice. Lastnosti olja, ki vplivajo na proces jamičenja, so: viskoznost, delovna temperatura in vrsta osnovnega olja, medtem ko imata vrsta in količina aditiva majhen vpliv na utrujanje ([27] in [28]).

Normalna drsna obraba se pojavi pri majhnih hitrostih in visokih tlakih. Prvi pogoj za običajno obrabo je torej mejno področje mazanja [27]. V primeru majhnih hitrostih je stopnja obrabe odvisna predvsem od obremenitve. Pri preprečevanju običajne drsne obrabe ima mazivo odločilno vlogo [29].

Mazalna olja na osnovi oljne repice imajo dobre mazalne lastnosti in zato preprečujejo nastanek zajedanja, jamičenja in obrabe površin v tribološkem kontaktu. Žal pa so zaradi svoje kemične sestave (trigliceridi) zelo nagnjena k oksidaciji. Oksidacija in samo-oksidacija povzročata cepljenje dolge aciklične verige in razpad organskih kislin.

Posledica oksidacije je nastajanje agresivnih kislih ostankov, ti vplivajo na poškodbe elastomerov, in polimerizacijske reakcije, ki zvečujejo viskoznost repičnega olja in pospešujejo korozijo strojnih delov v dotiku.

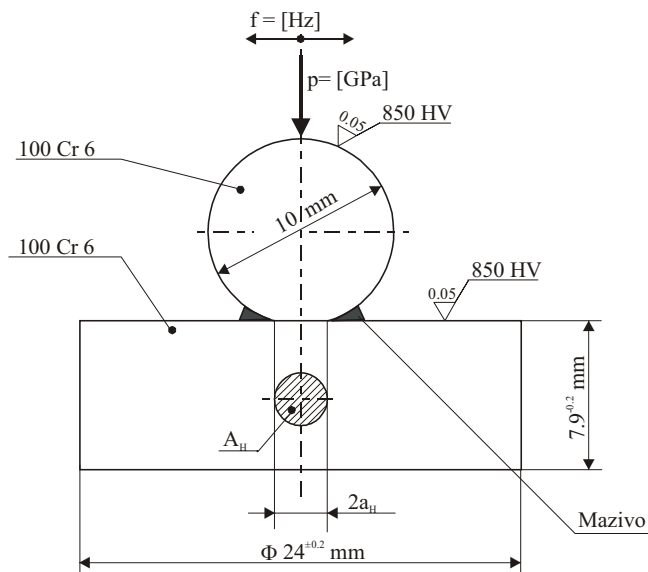
Na postopek oksidacije imata največji vpliv temperatura in navzočnost kovin - katalizatorjev (npr. baker). Z višanjem temperature se oksidacijska stabilnost olja zmanjša, s tem pa tudi uporabnost olja zaradi povečane viskoznosti in kislosti. Posledice so zmanjšanje mazalnih lastnosti in povečana korozija kovinskih delov. 'Kisanje olja' spremljamo z nevtralizacijskim številom, polimerizacijo pa z merjenjem viskoznosti ([26] in [30]).

## 2 OPIS NAPRAV IN POSTOPKOV ZA PRESKUŠANJE MEHANSKO-DINAMIČNIH LASTNOSTI OLJ

### 2.1 Visokofrekvenčna naprava za merjenje trenja in obrabe (SRV)

Preskuševališče SRV uporabljamo za določevanje koeficienta trenja in obrabe pri izmeničnem gibanju z visoko frekvenco in majhno amplitudo, v razmerah mejnega mazanja [31].

Jeklena kroglica pod obremenitvijo izmenično drsi po jekleni ploščici (slika 1). Zgornji in



Sl. 1. Modelni sistem kroglica - ploščica

spodnji preskušavec sta izdelana iz jekla 100Cr6, s srednjim odstopkom površinske hrapavosti  $R_a = 0,05$  mm. Preskušanje je standardizirano po DIN 51 834.

Standard načrtuje merjenje koeficienta trenja pri frekvenci 50 Hz, drsni poti 1000  $\mu\text{m}$  (drsna hitrost 0,1 m/s) in telesni temperaturi 80°C in običajnem tlaku v dotiku 3,17 GPa. Predpisan čas trajanja preskusa je 120 min. Pred preskušanjem in po njem smo preskušance očistili z zdravniškim bencinom v ultrazvočni kopeli. Med preskusi se koeficient trenja neposredno zapisuje, obrabo smo določali posredno, z merjenjem velikosti obrabnih kotanj na spodnjem preskušancu. Vsak preskus smo trikrat ponovili.

V pričujoči raziskavi smo koeficiente trenja določali pri tlakih, 1 GPa, 2 GPa, 2,5 GPa in 3,17 GPa. Z izbranimi tlaki smo se približali dejanskim razmeram pri zobnikih, pri katerih so tlaki v območju  $\sim 1$  GPa.

## 2.2 Preskuševališče FZG

Za preskušanje odpornosti olj na zajedanje, jamičenje in normalno drsno obrabo uporabljamo standardno preskuševališče FZG. Slika 2 prikazuje shematični prikaz preskuševališča FZG, ki je standardizirano po DIN 51 354 [32] in ISO CD 14635-1 [33].

Preskuševališče FZG je sestavljeno iz dveh predležij, od katerih je eno preskusno, drugo pa prenosno. Gredi s posebno napravo zasučemo v nasprotno smer in ustvarimo na zobnih bokih potrebno obodno silo. Moč kroži po gredeh med obema predležijama, preskuševališču pa dovajamo toliko dela, da pokrijemo energijske izgube v predležjih. Količina preskusnega olja v sistemu je bila približno 1,7 litra. Med preskusom smo obremenitev povečevali stopenjsko. Predpisane obremenitve na zobnih bokih in Hertzovi tlaki v kinematski točki za posamezno stopnjo so podani v literaturi [32].

Pred preskusom in po njem smo preskusne zobnike in celotno preskusno gonilo temeljito očistili z zdravniškim bencinom.

Za preskušanje uporabljamo zobniški dvojici tipa 'A' in tipa 'C'. Zobniška dvojica tipa A, ki jo uporabljamo za preskušanje deleža zajedanja, je izdelana iz površinsko naogljčenega jekla DIN 20MnCr5. Globina ogljčenja zobnih bokov je 0,6 do 0,8 mm, trdota 60 do 62 HRC, povprečna izmerjena srednja vrednost hrapavosti ( $R_a$ ) na bočnici zob je za zobnik 0,16  $\mu\text{m}$  in za pastorek 0,24  $\mu\text{m}$ .

Zobniška dvojica tipa C, ki jo uporabljamo za preskušanje deleža jamičenja in normalne obrabe, je izdelana iz površinsko naogljčenega jekla DIN 16MnCr5. Globina ogljčenja zobnih bokov je 0,8 do 1,0 mm, trdota pa 60 do 62 HRC. Povprečna izmerjena srednja vrednost hrapavosti ( $R_a$ ) na bočnici je za zobnik 0,12 mm in za pastorek 0,16 mm. Glavne geometrijske značilnosti za oba tipa zobnikov so zbrane v literaturi ([32] do [34]).

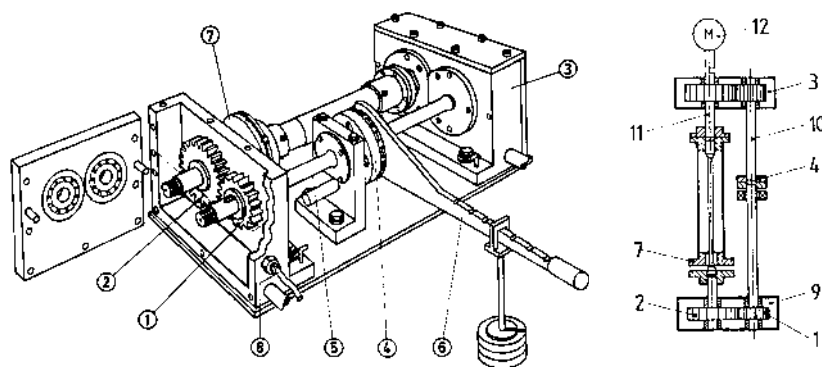
Razlika med zobniško dvojico tipa A in tipa C je v različni dejanski širini zob in približno za 35 odstotkov višji relativni drsni hitrosti, ki jo dosega zobniška dvojica tipa A.

### 2.2.1 Postopek določevanja stopnje zajedanja

Zmožnost mazalnih olj za preprečevanje zajedanja smo določili po standardu DIN 51 354. Zmožnost olja je podana s stopnjo obremenitve, pri kateri se pojavi kritična poškodba zobnih bokov [32].

### 2.2.2 Postopek določevanja odpornosti na jamičenje

Preskus ni standardiziran, vendar se splošno uporablja za določevanje zmožnosti maziv pri preprečevanju jamičenja. Podrobno je opisan



1	preskusni zobnik 1	7	sklopka za merjenje vrtilnega momenta
2	preskusni zobnik 2	8	temperaturno zaznavalo
3	prenosno gonilo	9	preskusno gonilo
4	obremenitvena sklopka	10	torzijska gred 1
5	zatič za blokado sklopke	11	torzijska gred 2
6	ročica za obremenjevanje	12	elektromotor

Sl. 2. Shematični prikaz preskuševališča FZG

v literaturi [35]. Za ta preskus uporabljamo zobniško dvojico *tipa C*. Mazanje zobniške dvojice med preskusom je postopno. Med preskusom s hlajenjem vzdržujemo stalno temperaturo olja 90°C.

### 2.2.3 Postopek preskušanja zmožnosti preprečevanja običajne drsne obrabe

V traktorskih pogonskih sistemih prihaja zaradi velikih obremenitev pri majhnih drsni hitrostih do povečanih kontaktnih temperatur. Na nekaterih geografskih področjih je v olju tudi večja količina vode. Zato se na stožčastih zobnikih v prenosniku običajno pojavi zajedanje, na zobnikih planetnega gonila pa običajna drsna obraba.

Za preskus običajne obrabe uporabljamo dve metodi. Standardizirano metodo po ASTM D 4998 in metodo, ki sta jo predlagala B.M. O'Connor in H. Winter [37]. Po metodi ASTM (SO - stopnja obremenitve 10;  $v_r=0,57$  m/s,  $T_o=121$  °C,  $t=20$  h) se uporablja zobniška dvojica *tipa A*; po metodi, ki sta jo predlagala omenjena avtorja, pa uporabljamo zobniško dvojico *tipa C* [12]. Preskusni pogoji za preskus FZG običajne drsne obrabe so zbrani v preglednici 1 in so usklajeni z izdelovalci traktorske opreme (OEM).

Posebej problematična je voda v repičnih oljih ([37], [38] in [14]). Zato je za preskus teh olj uporabna metoda B (preglednica 1).

Po metodi A in B je preskus sestavljen iz dveh stopenj. Po vsaki stopnji se preskusni zobniki pregledajo in stehtajo. S tehtanjem določimo obrabo zobnih bokov obeh preskusnih zobnikov v mg nato pa na podlagi prenesenega dela izračunamo še specifično obrabo v mg/kWh.

### 2.3 Opis naprav in postopkov za merjenja fizikalno-kemijskih lastnosti olj

Od velikega števila fizikalno kemijskih parametrov, ki popisujejo lastnosti olja, merimo: viskoznost, delež prostih kislin (nevtralizacijsko število) in delež produktov oksidacije (infrardeči spektri). Izmerjene vrednosti uporabljamo pri določitvi obdobja menjave olja in določitvi obratovalne temperature, pri kateri oksidacija še ni problematična.

Kinematično viskoznost preskusnih olj smo pred in med preskusi ter po preskusi merili s viskozimetrom na kapilaro, tipa Cannon-Fenske po standardu ISO 3104.

Delež prostih kislin podajamo z nevtralizacijskim številom, postopek merjenja smo opravili po standardu ISO 6618. Numerična vrednost nevtralizacijskega števila je količina kisline, izražena v mg KOH na g vzorca, ki jo porabimo za nevtralizacijo vzorca. Nevtralizacijsko število kaže stopnjo oksidacije in ga običajno uporabljamo skupaj z metodo za merjenje površinske napetosti pri nadzoru stanja maziva.

Posnete infra rdeče spektre tipa FTIR smo uporabili za določitev oksidacije, samo-oksidacije in polimerizacije olj. Stopnjo oksidacije olj ugotavljamo z diferencialnimi spektri, ki jih dobimo tako, da od infrardečega spektra uporabljenega olja odštejemo infrardeči spekter svežega olja.

### 2.4 Analize obrabnih površin

Po končanem preskusu smo analizirali poškodbe na preskusnih vzorcih in zobnih bokih z optičnim mikroskopom (OM) in elektronskim mikroskopom (SEM). Za razumevanje kemičnih reakcij

Preglednica 1. Preskusni pogoji preskusa FZG normalne obrabe

	Metoda A		Metoda B	
	1 stopnja	2 stopnja	1 stopnja	2 stopnja
Stopnja obremenitve	10	10	10	10
obremenitev Nm	372,6	372,6	372,6	372,6
obodna hitrost m/s	0,35	0,20	0,35	0,20
št. vrtljajev min <sup>-1</sup> :				
pastorek	93	53	93	53
zobnik	62	35	62	35
delovna temperatura °C	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
čas h	20,0	30,0	20,0	30,0
preneseno delo kWh	72,4	62,2	72,4	62,2
<b>Primes</b>	-	-	<b>1 % v/v vode</b>	

Preglednica 2. Fizikalno-kemijske lastnosti preskusnih olj

Oznaka olja	Gostota $\rho_{15^\circ}$ kg/m <sup>3</sup>	Viskoznost		Nevtralizacijsko število TAN mgKOH/g
		$\nu_{40^\circ}$ mm <sup>2</sup> /s	$\nu_{100^\circ}$ mm <sup>2</sup> /s	
<b>Repična olja</b>				
BIO 1	920	37,69	8,63	0,42
BIO 2	890	48,38	10,38	0,55
BIO 3	921	43,68	10,56	0,36
<b>Mineralno olje</b>				
MIN 1	887	70,89	8,55	0,52/0,24
<b>Mešanica</b>				
BM	/	38,46	8,53	0,37

aditivov s kovinsko površino smo analizirali kontaktne površine vzorcev preskušancev na mikroskopu SEM z rentgenskim analizatorjem (EDXS).

### 3 VRSTE IN LASTNOSTI OLJ ZA PRESKUŠANJE

Za preskus smo izbrali tri na trgu dostopna hidravlično/reduktorska biološko razgradljiva olja na osnovi oljne repice (okrajšava bio) različnih izdelovalcev in eno primerljivo mineralno reduktorsko olje (min). Poleg teh štirih vzorcev smo za preskus normalne abrazivne obrabe pripravili tudi mešanico 90 % olja bio 1 in 10 % olja min 1 (okrajšava BM). Za preskus mešanice smo se odločili, da bi ugotovili mazalne razmere v primeru 'kontaminacije' repičnega olja z mineralnim [42]. Fizikalno-kemijske lastnosti preskusnih olj so zbrane v preglednici 2.

Diagram na sliki 3 prikazuje spremembo kinematične viskoznosti preskusnih olj v odvisnosti od temperature. Vsa tri repična olja in mešanico smo izbrali z visokim indeksom viskoznosti, mineralno olje pa z nizkim indeksom viskoznosti.

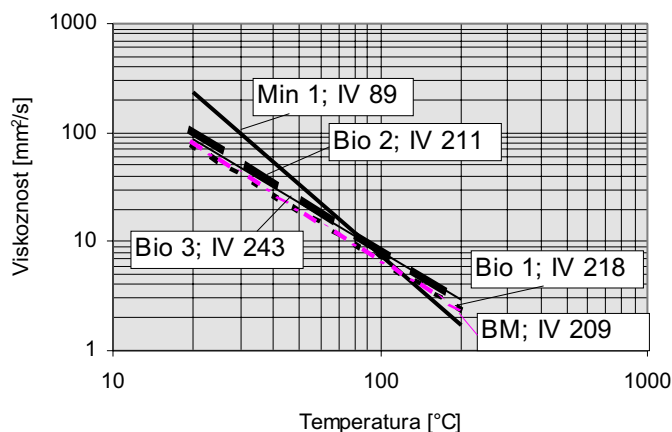
Olja na osnovi oljne repice razvrstimo po kemijski zgradbi med lipide, natančneje med trigliceride. Trigliceridi so sestavljeni iz glicerola-propan-tri-ol, ki je povezan s tremi maščobnimi kislinami. V preglednici 3 so prikazane vrste in deleži maščobnih kislin, ki jih vsebujejo za preskus izbrana biološka olja bio 1, bio 2 in bio 3.

Dolžine ogljikove verige in utežni deleži maščobnih kislin v olju imajo velik vpliv na osnovne mazalne lastnosti in oksidacijsko stabilnost olja [30].

### 4 SKLEP

V tem prispevku smo predstavili naprave in metode, ki smo jih uporabili za določitev mehanskih in fizikalno-kemijskih lastnosti repičnih olj v primerjavi z mineralnim mazalnim oljem. Opisali smo postopek izbire in lastnosti preskusnih mazalnih olj. Viskoznost za repična olja smo izbrali nižjo od viskoznosti mineralnega olja. S tem smo dobili približno enako viskoznost za vsa preskusna olja pri začetni temperaturi preskušanja.





Sl. 3. Razmerje viskoznost - temperatura

Preglednica 3. Vrste in delež maščobnih kislin v preskušanih repičnih oljih

Maščobne kisline		Bio 1	Bio 2	Bio 3	Rafinat repičnega olja-brez dodatkov
		%	%	%	%
palmitinska	C16:0	4,6	4,9	4,2	2,5-6,0
stearinska	C18:0	1,8	1,0	1,6	0,8-2,5
oleinska	C18:1	58,9	60,4	61,0	50-66
linoleinska	C18:2	21,6	27,6	19,2	18-28
linoleninska	C18:3	8,7	6,0	7,2	6,0-14
arhidinska	C20:0	0,5	-	-	0,1-1,2
gadoleinska	C20:1	1,3	-	1,6	0,1-4,3
beheninska	C22:0	0,6	-	-	do 0,6
eruka	C22:1	0,3	-	-	do 5,0

## 5 LITERATURA

- [1] Möller, U.J. (1994) Biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe-Einführung in die Problematik, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie*, TAE 94.
- [2] Robertson, A.J., S.J. Randles (1990) The use of laboratory techniques to simulate biodegradation of lubricants in the environment, *Maziva '90*, Opatija.
- [3] Möller, U.J. (1988) Umweltaspekte beim Einsatz von Schmierstoffen, *VDI-Ber. 680*, 321-337.
- [4] Hänssle, P., D. Hoppe (1994) Umweltverträgliche syntetisch Schmierstoffe, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie*, TAE 94.
- [5] Wilkinson, J. (1993) Biodegradable lubricants-a review, *Maziva 93-Poreč*.
- [6] Weyandt, R.G. (1990) Ökologische Bewertung von Arbeitsflüssigkeiten und Schmierölen durch Biotests, *Ölhydraulik und Pneumatik* 34, 6, 396-400.
- [7] Bernhard, U., G. Schülert, R. Lindner, B. Wenzel (1994) Zur Veränderung der biologischen Abbaubarkeit von Hydraulikölen auf Pflanzenölbasis unter Praxisbedingungen, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie*, TAE 94.
- [8] Lal, K., V. Carrick (1994) Performance testing of lubricants based on high oleic vegetable oils, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie*, TAE 94.
- [9] Csernohavlek, E. (1989) Testmethoden der biologischen Abbaubarkeit, Wien.
- [10] Weyandt, R.G., S. Six, A. Rieger (1994) (Öko-)Toxikologische Testverfahren zur Gefährdungsabschätzung von Schmierstoffen - Vergleiche von Einzelstofftoxizitäten und Kombinationswirkungen, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie*, TAE 94.
- [11] Udovč, A. (1996) Preizkusne metode za določevanje biološke razgradnje maziv, *Zbornik predavanj Slotrib 96*, Gozd Martuljek.
- [12] Božič, R. (1994) Tribološke lastnosti biološko hitro razgradljivih olj, *seminar*, Ljubljana.
- [13] Texaco Lubricants Division (1992) The need for biodegradable lubricants, *ILT*, 6-7.
- [14] Hubmann, A. (1994) Chemie pflanzlicher Öle, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie*, TAE 94.

- [15] Kabuya, A., J.L. Bozet (1995) Comparative analysis of the lubricating power between a pure mineral oil and biodegradable oils of the same mean ISO grade, *Lubricants and Lubrication / D. Dowson (Editor), Elsevier*.
- [16] Vižintin, J., M. Anželj M., A. Arnšek A. (1994) Analiza triboloških lastnosti biološko razgradljivega olja VERIGOL BIO, poročilo, Ljubljana.
- [17] Möller, U.J. (1994) Entsorgungsmöglichkeiten für biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 94*.
- [18] Randles, S.J. (1994) Formulation of environmentally acceptable lubricants, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 94*.
- [19] Busch, C. (1994) Biologisch schnell abbaubare Hydraulikflüssigkeiten, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 94*.
- [20] Becker, R., A. Knorr, P. Studt (1994) Antioxidanten für pflanzliche Öle, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 94*.
- [21] Hubmann, A. (1994) Additivierung pflanzlicher Schmierstoffe, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 94*.
- [22] Schülert, G., U. Bernhard, G. Ude, G. Geiger (1994) Alterungsverhalten von umweltschonenden Hydraulikflüssigkeiten, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 94*.
- [23] Michaelis, K., B.-R. Höhn (1994) Reibungsverhalten biologisch leicht abbaubarer Schmierstoffe, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 1994*.
- [24] Arnšek, A., J. Vižintin (1994) Preizkušanje mehansko lastnosti olj, *Zbornik predavanj Slotrib 94*, Gozd Martuljek.
- [25] Arnšek, A. (1996) Zajedanje in jamičenje, *Drugi seminar, FS Ljubljana*.
- [26] Feldin, M. (1994) Preizkušanje fizikalnih in kemijskih lastnosti maziv, *Zbornik predavanj Slotrib 94*, Gozd Martuljek.
- [27] Ku, P.M., Gear failure modes - importance of lubrication and mechanics, ASLE Preprint No. 75AM-SA-1.
- [28] Michaelis, K. (1992) FZG Test Procedures.
- [29] Williams, J.A. (1994) Engineering tribology, *Oxford Science Publications*.
- [30] Arnšek, A. (1994) Lastnosti biološko razgradljivih olj, *Prvi seminar, FS Ljubljana*.
- [31] DIN 51 834 (1992) Mechanisch-dynamische Prüfung im Oszillation-Frictions-Prüfgerät.
- [32] DIN 51 354 (1990) FZG Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine.
- [33] ISO CD 14635-1, Load carrying capacity test for oils.
- [34] FVA Informationsblatt Nr. 54/I-IV (1993) Graufleckigkeit.
- [35] Winter, K. Michaelis (1985) FZG Gear test rig description and test possibilities, Co-ordinating European Council, *Second International Symposium*, West Germany.
- [36] ASTM D 4998 (1989) Evaluating wear characteristics of tractor hydraulic fluids.
- [37] O'Connor, B.M., H. Winter (1992) Use of low speed FZG test methods to evaluate tractor hydraulic fluids, *Engine Oils and Automotive Lubrication, Expert Verlag*.
- [38] Feldmann, D.G., J. Hinrichs (1994) Umweltverträgliche Hydraulikflüssigkeiten in hochbelasteten hydrostatischen Getrieben, *Ökologische und ökonomische Aspekte der Tribologie, TAE 94*.
- [39] Dowson, D., G.R. Higginson (1966) Elastohydrodynamic lubrication, Oxford, *Pergamon Press*.
- [40] Winter, H., B.-R. Höhn, K. Michaelis, E. Kagerer (1991) Measurements of pressure, temperature and film thickness in disk and gear contacts, *JSME International Conference on Motion and Powertransmissions*, Hiroshima, Japan.
- [41] Stachowiak, G.W., A.W. Batchelor (1993) Engineering tribology, *Elsevier*.
- [42] Tallian, T.E. (1967) On competing failure modes in rolling contact, *ASLE Transactions*, Vol. 10.
- [43] ISO 6336-4 (1993) Calculation of scuffing load capacity of cylindrical, bevel and hypoid gears.

Naslov avtorjev: prof.dr. Jože Vižintin  
Aleš Arnšek  
Fakulteta za strojništvo  
Univerza v Ljubljani  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana

Prejeto:  
Received: 30.1.2001

Sprejeto:  
Accepted: 27.6.2001