

**Bernd-Robert Hoehn, Karsten Stahl, Klaus Michaelis**

ISSN 0350-350X

GOMABN 51, 1, 5-28

Izvorni znanstveni rad / Original scientific paper

## UTJECAJ MAZIVA NA TROŠENJE ZUPČANIKA KOD MALIH BRZINA

### Sažetak

U slučaju rada zupčanika u uvjetima velikog opterećenja i male obodne brzine debljina mazivog filma često je nedovoljna za potpuno razdvajanje nalijegajućih površina. Može doći do trošenja bočnih strana zupčanika ili čak do potpunog propadanja zupčanika. Glavni parametri za određenu geometriju zupčanika, koji utječu na trošenje su opterećenje, obodna brzina i mazivo. Karakteristike maziva s obzirom na trošenje ovise o brojnim čimbenicima. Viskoznost, tip baznog ulja i aditiva imaju jako velik utjecaj. Za rad zupčanika pri niskim brzinama uglavnom se koriste maziva s aditivima protiv trošenja koji stvaraju kemijski i/ili fizikalno učinkovit sloj. Za ispitivanje sposobnosti maziva za zaštitu protiv trošenja prikladna ispitna metoda razvijena je primjenom FZG testa. FZG test trošenja pri niskim brzinama C/0,05/90:120/12 provodi se pri vrlo malim obodnim brzinama ( $v = 0,05$  m/s and  $0,57$  m/s) i pri dvije različite ispitne temperature ( $\vartheta_{ulje} = 90$  °C i  $120$  °C). Test se sastoji iz tri dijela i provodi se u nekoliko razdoblja. Ukupno test traje 120 h. Ispitni zupčanici su C-PT tipa, isti kao za FZG piting test. Razvoj ovog ispitivanja omogućio je ispitivanje velikog broja različitih maziva za različite namjene. Rezultati ispitivanja pokazuju jasne razlike. Određene su linearne, degresivne i progresivne brzine trošenja. Maziva na temelju istog baznog ulja i iste viskoznosti pa čak i s istom vrstom aditiva mogu se u potpunosti razlikovati s obzirom na njihovo ponašanje naspram trošenja. Također, njihove se odlike na različitim temperaturama mogu značajno razlikovati. Zbog djelovanja aditiva neka maziva pokazuju smanjenje brzine trošenja s porastom temperature, dok se u slučaju nekih drugih maziva čini da temperatura nema nikakvog utjecaja. Ispitna metoda C/0,05/90:120/12 predstavlja prikladan način određivanja ponašanja maziva sa stanovišta trošenja. Ispitivana maziva mogu se karakterizirati i rangirati s obzirom na njihovo trošenje u uvjetima mješovitih i rubnih uvjeta podmazivanja.

Provedeni su različiti testovi s mazivima onečišćenima prašinom radi simulacije zahtjevnih okolišnih uvjeta kao npr. u rudniku ili na gradilištu. Također, određen je utjecaj starenja ulja na trošenje kod rada zupčanika pri malim brzinama. Rezultati testa trošenja pri maloj brzini mogu se uvrstiti u računski postupak. Računski postupci omogućuju procjenu očekivane brzine trošenja zupčanika u primjeni kad se koristi ispitivano mazivo.

*Ponovljeni izračuni oštećenja zbog trošenja u mjenjačima lokomotiva pokazali su blisku povezanost između izračunatih i vrijednosti dobivenih u primjeni. Najveća poboljšanja ostvarena su primjenom maziva poboljšanih odlika s obzirom na trošenje što je utvrđeno na temelju rezultata testa trošenja pri niskim brzinama.*

## 1. Uvod

Kako bi se smanjili gubici zbog neoperećenja te time povećala učinkovitost zupčanika obično se koriste maziva niske viskoznosti. Rezultat toga je tanki mazivi sloj između nalijegajućih površina zupčanika. Ovaj učinak je još važniji kod visokih radnih temperatura, među ostalim, prouzročen i malim ukupnim količinama maziva. Kod zupčanika pri malim brzinama može doći do miješanog i graničnog podmazivanja pri velikom opterećenju tako da nalijegajuće površine nisu potpuno odvojene. U ovom slučaju kemijski ili fizički učinkoviti aditivi moraju pridonijeti smanjenju trošenja kliznih površina.

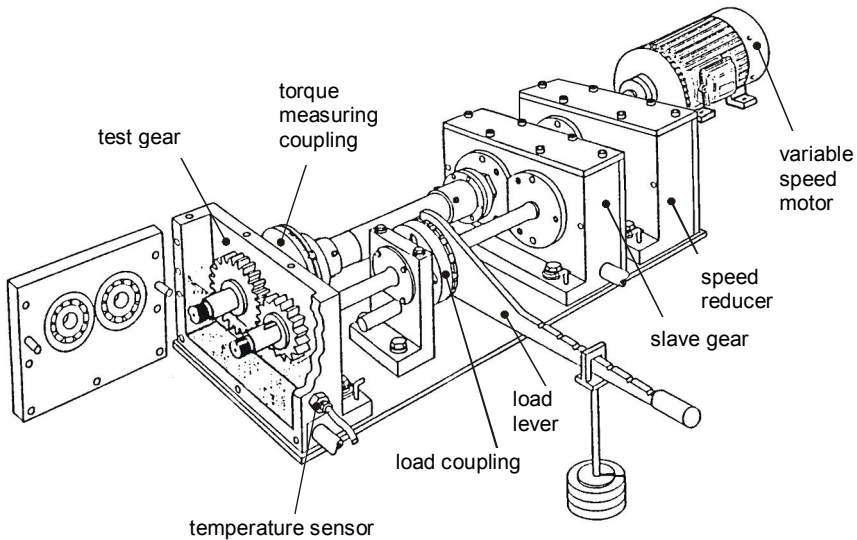
Trošenje znači kontinuirano odvajanje materijala s površine nepokretnog dijela, zbog mehaničkih djelovanja, odnosno dodira i relativnog gibanja kapljevito ili plinovito s nalijegajućim čvrstim dijelom [4]. Kod zupčanika trošenje se odnosi na kontinuirano odvajanje materijala na bočnim stranama zuba prilikom svakog zahvata što dovodi do povećanog odstupanja profila u odnosu na početnu geometriju bočnih strana zupčanika. Neprestanim oštećivanjem zbog trošenja može doći do dinamičkih učinaka kao i ostalih vrsta oštećenja zupčanika. Kod uređaja s visokim zahtjevima preciznosti, primjerice u robotici, trošenje, a time i sve veći bočni zazor mogu dovesti do potpunog prestanka rada uređaja.

U svrhu određivanja karakteristika trošenja maziva za zupčanike dostupan je bio jedino ASTM test trošenja A/0,57/120/10 [1]. Ovaj test je razvijen za određivanje karakteristika trošenja hidrauličkih tekućina namijenjenih traktorima, što ne omogućava određivanje (razlikovanje) maziva veće viskoznosti. Stoga je u okviru različitih projekata [2,6,8] sustavno ispitan utjecaj maziva na trošenje zupčanika pri niskim brzinama. Za potrebe ispitivanja razvijen je FZG test trošenja C/0,05/90:120/12 [3]. Ispitivanje je provedeno na modificiranom FZG probnom stolu te pruža detaljne podatke o osobitostima maziva s obzirom na sprječavanje trošenja pri dvije različite temperature, a u uvjetima miješanog i graničnog podmazivanja.

## 2. Ispitni postupci

### 2.1 Ispitni uređaj i ispitni zupčanici

Test je proveden na modificiranom FZG probnom stolu s dodatnim uređajem za smanjenje brzine kao što je prikazano na slici 1. Korišteni su isti ispitni zupčanici FZG C-PT kao i u FZG piting testu. Osnovni podaci prikazani su u tablici 1.



Slika 1: Modificirani FZG test

Tablica 1: Osnovni podaci o ispitnim zupčanicima tipa C

	simbol	jedinica	vrijednost
razmak osi	$a$	mm	91,5
broj zubi mali zupčanik	$z_1$	-	16
veliki zupčanik	$z_2$	-	24
modul	$m$	mm	4,5
zahvatni kut	$\alpha$	°	20
nagib boka zuba	$\beta$	°	0
širina uzubine	$b$	mm	14
faktor pomaka profila mali zupčanik	$x_1$	-	0,1817
veliki zupčanik	$x_2$	-	0,1715
diobeni promjer mali zupčanik	$d_{w1}$	mm	73,2
veliki zupčanik	$d_{w2}$	mm	109,8
vanjski promjer mali zupčanik	$d_{a1}$	mm	82,5
veliki zupčanik	$d_{a2}$	mm	118,4
materijal	MAT	-	16MnCr5
toplinska obrada	-	-	površinsko kaljenje

## 2.2 Uvjeti ispitivanja

Ispitivanje jedne vrste maziva sastoji se od 3 dijela koji se redom izvode na istoj bočnoj strani zupčanika. Uvjeti ispitivanja prikazani su u tablici 2.

Tablica 2: Uvjeti ispitivanja

Uvjeti ispitivanja	1. dio C/0,05/90/12	2. dio C/0,05/120/12	3. dio C/0,57/90/12
Obodna brzina na diobenoj kružnici	0,05 m/s	0,05 m/s	0,57 m/s
Brzina malog zupčanika	13 rpm	13 rpm	150 rpm
Brzina velikog zupčanika	8,7 rpm	8,7 rpm	100 rpm
Temperatura ulja	90 °C	120 °C	90 °C
Okretni moment	378,2 Nm	378,2 Nm	378,2 Nm
Hertzovo naprezanje na mjestu dodira	1853 N/mm <sup>2</sup>	1853 N/mm <sup>2</sup>	1853 N/mm <sup>2</sup>
Trajanje ispitivanja	2 x 20 h	2 x 20 h	1 x 40 h
Broj okretaja zupčanika	2 x 10400	2 x 10400	1 x 240000

U prvom i drugom dijelu ispitivanja razlika je jedino u temperaturi ulja. U trećem dijelu ispituje se utjecaj brzine. Uvjete prvog i drugog dijela ispitivanja moguće je ponoviti u trećem dijelu. Ispitivanje se izvodilo uz podmazivanje uranjanjem u ulje. Nakon svakog intervala ispitivanja zasebnim mjerenjem težine malog i velikog zupčanika određen je stupanj trošenja zupčanika. U usporedbi s uvjetima rada većine zupčanika u stvarnoj primjeni ovi su uvjeti ispitivanja vrlo zahtjevni. Upravo je zbog tog razloga unutar relativno kratkog vremena ispitivanja moguće odrediti maziva s poboljšanim karakteristikama trošenja. Primjena rezultata ispitivanja na uvjete rada zupčanika u praksi moguća je pomoću računске metode koju je razvio Plewe [7].

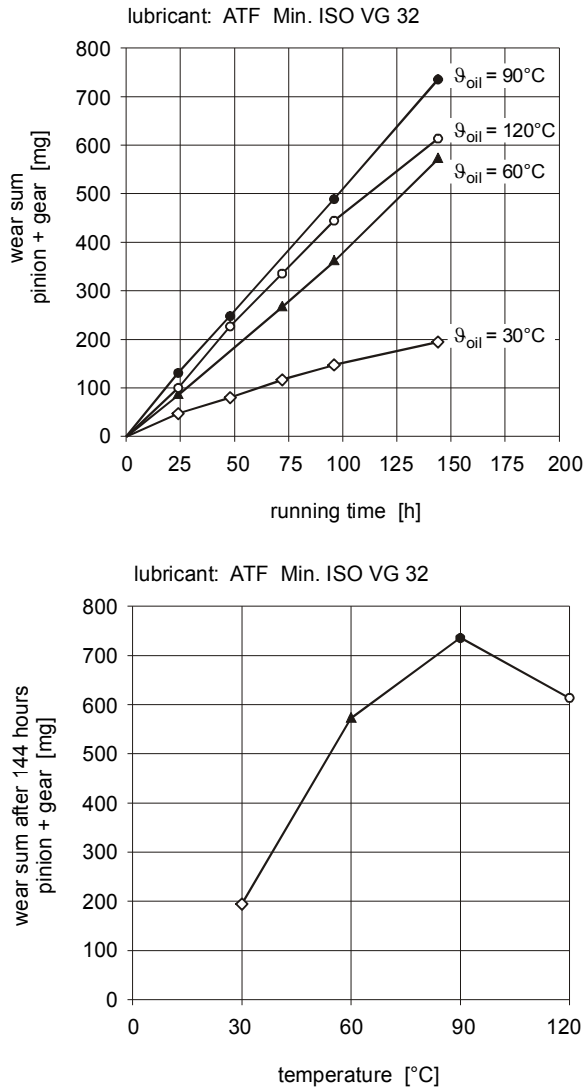
## 3. Utjecajni čimbenici

Ispitivane su različite vrste maziva koje se nalaze na tržištu. Riječ je o mazivima koja se međusobno razlikuju po namjeni i koja imaju različita bazna ulja, sustave aditiva i gradacije viskoznosti. Osnovni podaci o ovim mazivima prikazani su u tablici 3.

### 3.1 Temperatura i viskoznost

Porastom temperature viskoznost maziva se smanjuje, a time i debljina sloja. Stoga se pri višoj temperaturi očekuje povećano trošenje. Slika 2 prikazuje rezultate ispitivanja trošenja pri konstantnoj obodnoj brzini od  $v = 0,05$  m/s za različite temperature ulja. Povećanjem temperature ulja kod ispitivanog maziva povećava se trošenje. Najveća brzina trošenja pronađena je pri  $\vartheta_{ulje} = 90$  °C, a pri 120 °C trošenje je manje.

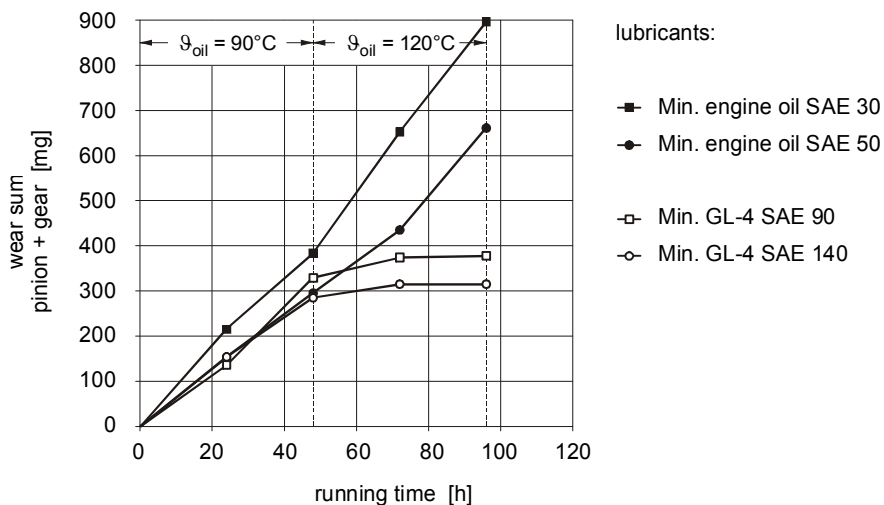
Do tog učinka dolazi zbog smanjenja utjecaja temperature na viskoznost u slučaju kada temperatura raste, kao i zbog utjecaja temperature na djelovanje aditiva. Povećanjem temperature može se povećati aktivnost aditiva te se poboljšava zaštita od trošenja.



Slika 2: Utjecaj temperature na trošenje pri malim brzinama

Tablica 3: Maziva

Bazno ulje	Primjena	Oznaka	Gradacija	Aditiv	Viskoznost pri 40 °C	Viskoznost pri 100 °C
Min	ATF	Dexron D	ISO VG 32	S-P + Ca	38 cSt	7,1 cSt
Min	motorno ulje	motorno ulje	SAE 30	ZDTP	99 cSt	12,0 cSt
Min	motorno ulje	motorno ulje	SAE 50	ZDTP	204 cSt	19,1 cSt
Min	MTF	GL-4	SAE 90	S-P	220 cSt	18,7 cSt
Min	MTF	GL-4	SAE 140	S-P	460 cSt	30,3 cSt
Min	osovinsko ulje	GL-5 man1	SAE 80W	S-P	108 cSt	11,4 cSt
Min	osovinsko ulje	GL-5 man2	SAE 80W90	S-P	137 cSt	14,0 cSt
Min + PAO	osovinsko ulje	GL-4	SAE 75W90	S-P	108 cSt	16,0 cSt
Min	ulje za traktor	UTTO	ISO VG 46	ZDTP	66 cSt	9,3 cSt



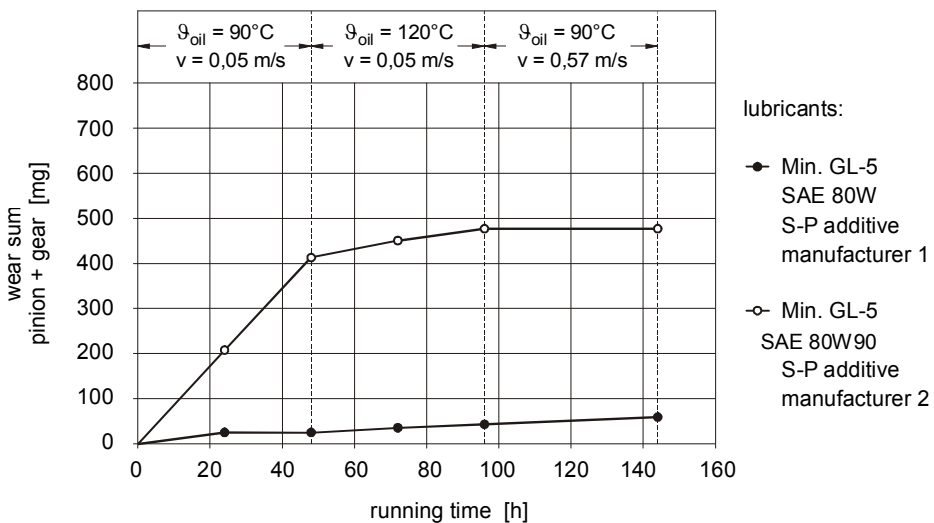
Slika 3: Utjecaj viskoznosti i temperature na trošenje pri niskim brzinama

Na slici 3 također je prikazan utjecaj viskoznosti i temperature. Slika prikazuje krivulje trošenja za dva motorna ulja i dva ulja za zupčanike koji se međusobno razlikuju po viskoznosti. Svaki par maziva pokazao je iste karakteristike trošenja. Kao što se i očekivalo, veća viskoznost smanjuje trošenje. Kod motornih ulja jedva da postoji ikakav utjecaj temperature na karakteristike trošenja. Povećanjem temperature brzina trošenja blago raste.

Kod ulja za zupčanike uočen je značajan utjecaj temperature na brzinu trošenja. Pri temperaturi od 90 °C zabilježeno je izrazito trošenje dok je ono gotovo nezatno pri temperaturi od 120 °C. Čini se da su aditivi aktivni pri višim temperaturama te u takvim uvjetima učinkovito smanjuju trošenje.

### 3.2 Aditivi

Pri miješanim i graničnim uvjetima podmazivanja aditivi značajno utječu na karakteristike trošenja kod određenog maziva. Slika 4 prikazuje krivulje trošenja dvaju mineralnih ulja API GL-5 različitih proizvođača. Maziva sadrže sumporno-fosforne aditive i slične su viskoznosti. Za temperaturu ulja od  $\vartheta_{ulje} = 90\text{ °C}$  i obodnu brzinu od  $v = 0,05\text{ m/s}$  karakteristike trošenja su potpuno drugačije dok su pri višim temperaturama i većim brzinama karakteristike trošenja vrlo slične.

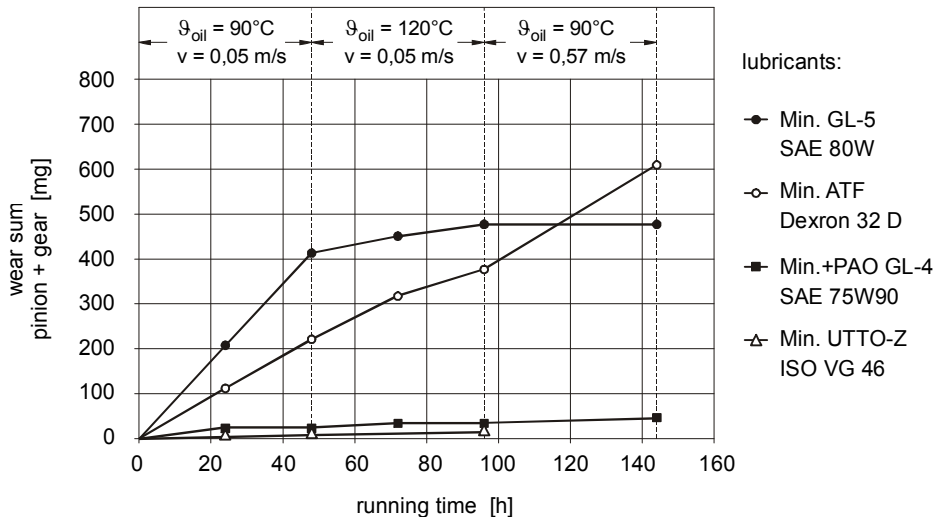


Slika 4: Utjecaj aditiva na trošenje pri niskim brzinama

## 4. Primjena

### 4.1 Razlike među mazivima

Pomoću FZG ispitnog postupka C/0,05/90:120/12 možemo razlikovati maziva s obzirom na njihove karakteristike trošenja. Na slici 5 prikazani su primjeri različitih maziva korištenih na različitim područjima primjene. Brzina trošenja maziva varira od malog do velikog trošenja. Kod pojedinih ulja karakteristike trošenja uvelike ovise o uvjetima ispitivanja dok kod nekih drugih ulja ti uvjeti nemaju takav utjecaj. Očito je da je vrlo teško predvidjeti brzinu trošenja različitih maziva poznavajući isključivo vrstu ulja, viskoznost ili sustav aditiva, a pritom ne provodeći nikakva ispitivanja.



Slika 5: Razlike među mazivima s obzirom na karakteristike trošenja

## 4.2 Izračun trošenja

U svrhu primjene rezultata FZG testa trošenja pri niskim brzinama na stvarne radne uvjete zupčanika u primjeni korištena je odgovarajuća metoda izračuna. Prema Pleweu [7] linearna količina trošenja  $W_l$  bočnih strana zupčanika nakon određenog broja ciklusa opterećenja može se izračunati na temelju:

$$W_l = c_{IP} \cdot \left( \frac{\sigma_H}{\sigma_{HT}} \right)^{1.4} \cdot \left( \frac{\rho_C}{\rho_{CT}} \right) \cdot \left( \frac{\zeta_W}{\zeta_{WT}} \right) \cdot N \leq W_{lall} \quad (1)$$

gdje je	$W_l$	[mm]	linearna količina trošenja
	$W_{lall}$	[mm]	dopuštena linearna količina trošenja
	$c_{IP}$	[mm/cycle]	koeficijent linearnog trošenja pri radnim uvjetima zupčanika u primjeni
	$\sigma_H$	[N/mm <sup>2</sup> ]	nominalno kontaktno naprezanje
	$\rho_C$	[mm]	polumjer zakrivljenosti na mjestu dodira (at pitch point)
	$\zeta_W$	[-]	specifično klizanje s utjecajem na trošenje
	$N$	[-]	broj ciklusa opterećenja
indeks	$T$	[-]	vrijednosti uvjeta ispitivanja

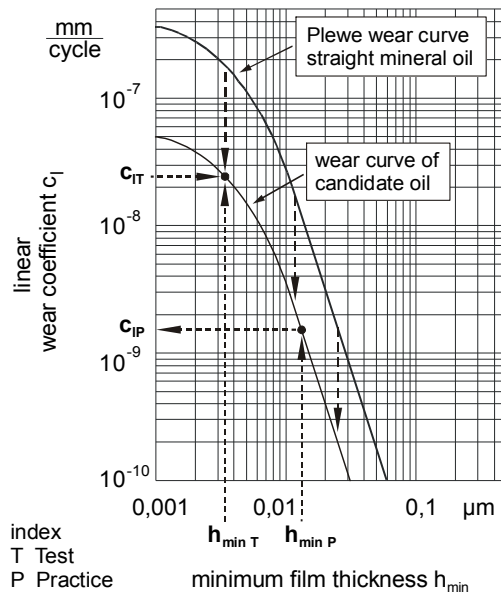
Linearna količina trošenja  $W_l$  je prosječna debljina istrošenog materijala s bočne strane zuba. Količina uklonjenog materijala uzduž bočne strane zupčanika nije jedinstvena na svim dijelovima. Maksimalno trošenje očekuje se na sredini između diobene kružnice i početka kontakta, odnosno prestanka kontakta. Maksimalno trošenje je oko tri puta veće od izračunate linearne količine trošenja  $W_l$ .



Presudnu ulogu u jednadžbi (1) ima koeficijent linearnog trošenja  $c_{IT}$ . U nedostatku rezultata ispitivanja može se koristiti vrijednost čistog mineralnog ulja prema Pleweu [7]. Za površinski kaljene zupčanike mjenjača on se može odrediti pomoću slike 6 uvođenjem izračunate debljine sloja pri radnim uvjetima. Za ispitivano mazivo s aditivima protiv trošenja ili EP aditivima koeficijent linearnog trošenja može se dobiti primjenom rezultata ispitivanja pri  $\vartheta_{ulje} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  pomoću jednadžbe:

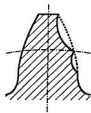
$$c_{IT} = \frac{m}{2 \cdot m_n \cdot b \cdot z \cdot \rho \cdot N} \quad (2)$$

gdje je  $c_{IT}$  [mm/cycle] koeficijent linearnog trošenja u uvjetima ispitivanja,  $m$  [mg] količina trošenja,  $m_n$  [mm] normalni modul,  $b$  [mm] širina uzubine,  $z$  [-] broj zubiju,  $\rho$  [mg/mm<sup>3</sup>] gustoća materijala,  $N$  [-] broj ciklusa opterećenja.

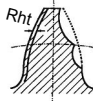


Slika 6: Koeficijent linearnog trošenja

Krenuvši s pretpostavkom da se maziva s aditivima protiv trošenja ili EP-aditivima ponašaju slično čistim mineralnim uljima, izvorna krivulja trošenja prema Pleweu za čista mineralna ulja je prikazana usporedno za ispitnu točku (slika 6). Ispitna točka je definirana kao  $c_{IT}$ , a debljina sloja  $h_{minT}$  u uvjetima ispitivanja. Relevantni koeficijent linearnog trošenja  $c_{IP}$  za ispitivano mazivo sada se može odrediti pomoću dijagrama za odgovarajuću debljinu sloja  $h_{minP}$  zupčanika u primjeni. Debljina sloja  $h_{min}$  može se izračunati prema metodi Dowson/Higginson [5]. Radi odgovarajuće podnošljivosti opterećenja izračunata količina trošenja mora biti manja od dopuštenog graničnog trošenja  $W_{I,all}$ . Ovisno o obliku i primjeni zupčanika mogu se rabiti različiti kriteriji za granično trošenje. Na slici 7 su prikazana dopuštena granična trošenja.

1. profile deviation

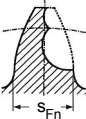
$$W_{I\text{fall}} = \frac{f_{r\text{all}}}{3} \quad f_r = \text{profile form deviation}$$

2. removal of hardened layer

$$W_{I\text{Rht all}} \approx 1 \times \text{case hardening depth} \\ Rht = f(\text{module, hardening treatment})$$

3. minimum thickness at tooth tip

$$W_{I\text{Sp all}} \approx \left[ d_a \cdot \left( \frac{\pi + 4 \cdot x \cdot \tan \alpha_n}{2 \cdot z} + \text{inv } \alpha_t - \text{inv } \alpha_{at} \right) - 0,1 \cdot m_n \right] \cdot \cos \alpha_{at}$$

4. tooth breakage safety

$$W_{I\text{F all}} \approx S_{Fn} \cdot \left[ 1 - 0,85 \cdot \sqrt{S_{FW} / S_F} \right]$$

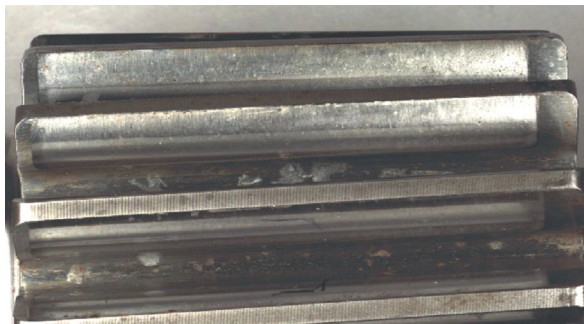
5. content of abrasive particles

$$\frac{W_m \text{ unfiltered}}{\text{lubricant quantity } m_S} = 0,1 \div 0,5 \text{ ‰} \hat{=} 100 \div 500 \text{ mg / kg}$$

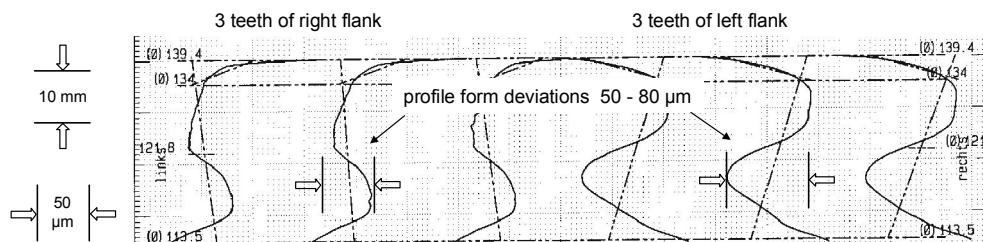
Slika 7: Dopuštena brzina trošenja prema Pleweu [7]

**4.3 Primjer iz prakse**

Na malim zupčanicima u mjenjačima lokomotiva privremeno korištenih u svrhu transporta ugljena u uvjetima velikog opterećenja i pri niskim brzinama ustanovljeno izraženo trošenje. Zbog odstupanja kod malih zupčanika dolazilo je do povećanih vibracija pri većim brzinama što je rezultiralo mehaničkim kvarom te čak oštećenjima na motoru. Slika 8 jest fotografija istrošenog malog zupčanika. Jasno su vidljivi znakovi oštećenja zbog trošenja. Na slici 9 prikazano je mjerenje profila triju zuba desne i triju zuba lijeve bočne strane istrošenog malog zupčanika. Odstupanja profila ispod diobene kružnice zbog trošenja su u rasponu od 50 do 80  $\mu\text{m}$ .



Slika 8: Istrošeni mali zupčanik kod lokomotive



Slika 9: Mjerenje oblika profila istrošenog malog zupčanika

Kao mazivo za zupčanike korišteno je mineralno ulje ISO VG 220 uz dodatak EP-aditiva. Prije se nije raspolagalo nikakvim podacima o karakteristikama trošenja ulja te je stoga provedeno ovo ispitivanje primjenom FZG ispitne metode za mjerenje trošenja pri malim brzinama C/0,05/90:120/12. U svrhu mogućeg poboljšanja također je izvedeno dodatno ispitivanje s poliglikolom istog razreda viskoznosti. Podaci o viskoznosti maziva i koeficijenti linearnog trošenja  $c_{IT}$  dobiveni iz rezultata ispitivanja na osnovi iste debljine sloja  $h_{\min} = 0,01 \mu\text{m}$  prikazani su u tablici 4. Radi usporedbe također su prikazani podaci o čistom mineralnom ulju ISO VG 220. EP mineralno ulje pokazuje poboljšane karakteristike trošenja u odnosu na čisto mineralno ulje. Poliglikol pokazuje najnižu brzinu trošenja. U usporedbi s EP mineralnim uljem za istu debljinu sloja očekuje se samo polovica količine trošenja. Pored toga, viskoznost poliglikola pri visokoj temperaturi je veća nego kod EP ulja zbog višeg indeksa viskoznosti VI. Stoga poliglikol omogućuje veću debljinu sloja u kontaktu pri visokoj temperaturi usprkos njegovoj pomalo nepovoljnoj ovisnosti viskoznosti o tlaku.

Tablica 4: Podaci o viskoznosti i koeficijenti linearnog trošenja

	EP mineralno ulje ISO VG 220	poliglikol ISO VG 220	čisto mineralno ulje ISO VG 220
$v_{40}$ [mm <sup>2</sup> /s]	215	219	220
$v_{100}$ [mm <sup>2</sup> /s]	19	38	19
VI [-]	99	226	97
$c_{IT}$ [mm/cycle] na $h_{\min} = 0,01 \mu\text{m}$	$20 \cdot 10^{-9}$	$10 \cdot 10^{-9}$	$50 \cdot 10^{-9}$

Tablica 5: Očekivano trošenje nakon 2000 h pri kritičnim radnim uvjetima

$\vartheta_{\text{ulje min}} = 105^\circ\text{C}$ $\vartheta_{\text{ulje PG}} = 95^\circ\text{C}$ $v = 0,1 \text{ km/h}$	EP mineralno ulje ISO VG 220	poliglikol ISO VG 220	čisto mineralno ulje ISO VG 220
$h_{\min}$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,004	0,008	0,004
$c_{IP}$ [mm/cycle]	$70 \cdot 10^{-9}$	$15 \cdot 10^{-9}$	$250 \cdot 10^{-9}$
$W_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	120	25	425

Mjerenja pokazuju da je pri kontaktu koeficijent trenja kod poliglikola u rasponu od samo 50 do 70 % onog kod mineralnih ulja. Stoga se kod korištenja poliglikola umjesto mineralnog ulja očekuje niža toplina pri trenju, a time i niža temperatura ulja u karteru. Prilikom primjene poliglikola očekuje se smanjenje temperature ulja u karteru za nekih 10 K. U skladu s tim pri istom opterećenju još se više povećava razlika u debljini sloja poliglikola i mineralnog ulja. Uzevši u obzir sve čimbenike koji utječu na debljinu sloja i očekivano trošenje nakon 2000 h rada pri kritičnim uvjetima izračunate su njihove vrijednosti kod primjene mineralnih ulja i poliglikola. Rezultati su prikazani u tablici 5. Očekivano trošenje  $W_1$  kod primjene poliglikola je smanjeno za faktor koji iznosi o 5 u usporedbi sa stvarno korištenim EP mineralnim uljem.

## 5. Zaključci

Karakteristike maziva s obzirom na trošenje ovise o brojnim parametrima. Pritom veliki utjecaj imaju viskoznost, vrsta baznog ulja, aditivi kao i radni uvjeti. Među mazivima koji se primjenjuju na istom području mogu biti značajne razlike s obzirom na karakteristike trošenja. Pomoću ispitnog postupka C/0,05/90:120/12 korišten je odgovarajući uređaj za određivanje karakteristika trošenja. Moguće je utvrditi razlike između pojedinih maziva s obzirom na njihove karakteristike trošenja pri miješanim i graničnim uvjetima podmazivanja na jednostavan i isplativ način. Također je moguće napraviti izračun po kojem se rezultati mogu primijeniti u stvarnim radnim uvjetima na bilo kojem zupčaniku.

## Literatura

- [1] ASTM Standard D 4998-89: Standard Test Method for Evaluating Wear Characteristics of Tractor Hydraulic Fluids, 1989.
- [2] Bayerdörfer, I.: Untersuchungen zum Einfluss von Schmierstoff und Betriebsbedingungen auf das Verschleißverhalten von Zahnrädern. DGMK Forschungsbericht Nr. 377-01, 1996.
- [3] DGMK Information: Method to Assess the Wear Characteristics of Lubricants - FZG Test Method C/0,05/90:120/12, 1997.
- [4] DIN 50323 Teil 2: Tribologie, Verschleiß, Begriffe, 1993.
- [5] Dowson, D.; Higginson, G. R.: Elastohydrodynamic Lubrication, Oxford, 1966.
- [6] Krieger, H.: Änderung des Verschleißverhaltens von Zahnrädern bei betriebsbedingten Ölveränderungen. DGMK Forschungsbericht Nr. 377-02, 2001.
- [7] Plewe, H.-J.: Untersuchungen über den Abriebverschleiß von geschmierten, langsam laufenden Zahnrädern. Dissertation TU München, 1980.
- [8] Vošiek, J.: Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung des Verschleißverhaltens von Schmierstoffen für Zahnradgetriebe. DGMK Forschungsbericht Nr. 377, 1992.

**Ključne riječi:** mazivo, zupčanici, trošenje, ispitna metoda, računaska metoda

## Autori

Bernd-Robert Hoehn, Karsten Stahl, Klaus Michaelis

e-pošta: michaelis@fzg.mw.tum.de

Gear Research Centre FZG, Technische Universität München, Germany

**Primljeno:** 16.8.2011. **Prihvaćeno:** 8. 1.2012.