

Bernd-Robert Hoehn, Peter Oster, Thomas Tobie, Klaus Michaelis

ISSN 0350-350X

GOMABN 47, 2, 129-152

Stručni rad/Professional paper

UDK 620.22.05 : 621.892.094 : 620.1.05

METODE ISPITIVANJA MAZIVA ZA ZUPČANIKE

Sažetak

Vrsta baznog ulja, viskoznost ulja, vrsta i sadržaj aditiva imaju značajan utjecaj na tipična oštećenja zupčanika. Općenito nije moguće jednostavno brojčano odrediti utjecaj maziva na sposobnost podnošenja opterećenja temeljem poznavanja fizikalno-kemijskih podataka o ulju. Stoga su razvijeni mnogobrojni ispitni postupci za procjenu mehaničko-tehnoloških svojstava maziva. Jednostavna i jeftina ispitivanja na probnim stolovima često pokazuju lošu korelaciju s praksom. Iz iskustva i sustavnog istraživanja moguće je pokazati da ispitivanje maziva za zupčanike može biti izvedeno na odgovarajući način samo u uređajima za ispitivanje zupčanika koja koriste specificiranu geometriju zupčanika [1].

Dugogodišnjim radom razvijen je normirani FZG probni stol sa čelnim zupčanicima s vanjskim ozubljenjem te unaprijeđen za različite vrste simulacija oštećenja zupčanika. Uobičajeni FZG uljni test A/8,3/90 široko je korišten za ocjenu svojstava ulja za industrijske zupčanike s obzirom na zaribavanje. Ulja za zupčanike vozila razine GL4 mogu se ispitivati u Step testu A10/16.6R/90, a ulja za osovine razine GL5 u Shock testu S-A10/16.6R/90. Za male brzine se može primijeniti test trošenja C/0.05/90:120. Utjecaj maziva na mikropiting ili mikrotočkastu koroziju zupčanika moguće je procijeniti pomoću kratkog testa za dodatnu provjeru GFKT-C/8,3/90. Postoje različita ispitivanja pitinga ili točkaste korozije poput testa s jednostrukim stupnjem opterećenja PT-C/9:10/90 ili testa primjene PTX-C/SNC/90.

Cilj rada je opisati utjecaj maziva na različite načine oštećenja u zupčanicima, kako kvantificirati taj utjecaj u ispitnim postupcima i kako rezultate ispitivanja predstaviti kao "značajne veličine" za mazivo u postupcima ocjenjivanja sposobnosti štetnog opterećenja.

Uvod

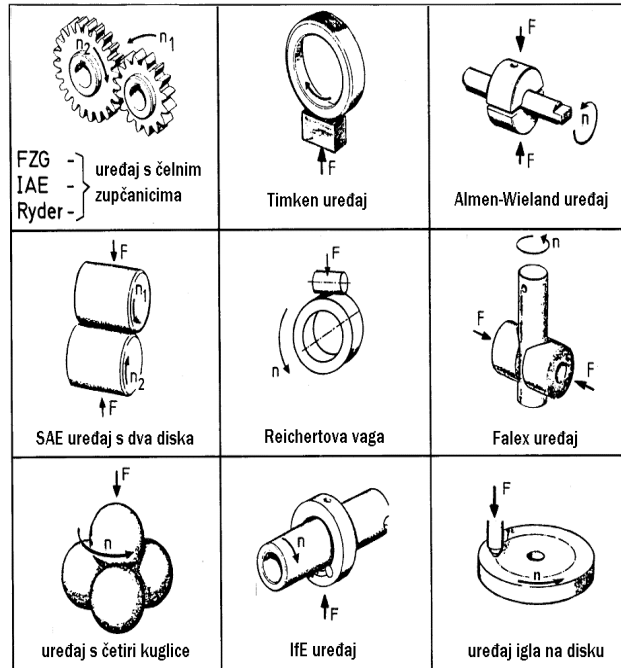
Za bolju učinkovitost prijenosnika koriste se niže gradacije viskoznosti i manje količine zupčaničkih ulja. Povećanjem specifične snage i intervala zamjene ulja povećavaju se i zahtjevi prema mazivu kao konstrukcijskom elementu.

Uvođenje svojstava maziva u ocjenu sposobnosti podnošenja opterećenja zahtijeva ne samo znanje njegovih fizikalnih svojstava poput primjerice viskoznosti, ovisnosti viskoznosti o temperaturi ili tlaku, već i kvantitativni utjecaj EP ulja na zaribavanje, trošenje, mikrotočkastu i točkastu koroziju zupčanika.

Razvijeni su brojni ispitni postupci za opisivanje svojstava maziva. U razmatranje se mogu uzeti jednostavna i jeftina ispitivanja na probnim stolovima kao i cijeli niz primjenskih ispitivanja [1]. Namjera je da se odabere jednostavni ispitni postupak, što je moguće jeftiniji i brži koji bi davao usporedive rezultate s praktičnom primjenom.

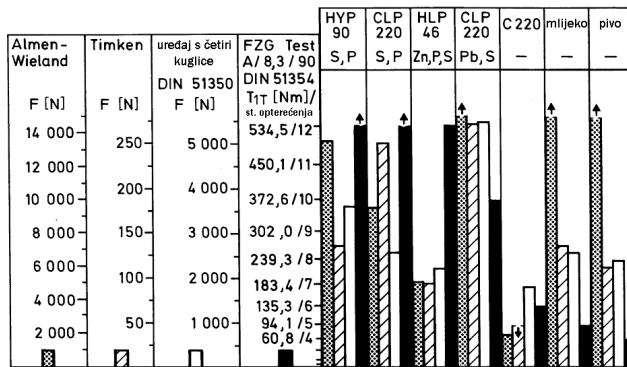
Slika 1 pokazuje neke od ispitnih uređaja razvijenih za određivanje svojstava zupčaničkih ulja s obzirom na zaribavanje i trošenje. Postupci koji koriste ispitne zupčanike su najbliže praksi. Postupci koji koriste ispitne uređaje s diskom uglavnom simuliraju dodir u jednoj točki na stazi zahvata zupčanika s njegovom lokalnom brzinom valjanja i klizanja. Većina uređaja koristi jednostavan uzorak u uvjetima čistog klizanja.

Slika 2 pokazuje rezultate zaribavanja na nekim od ovih ispitnih uređaja za različita "maziva" uključujući mlijeko i pivo [2]. U često navođenim ispitivanjima kao što su uređaj s četiri kuglice i Timken, mlijeko i pivo su ocijenjeni s većom sposobnošću podnošenja opterećenja poput mineralnog ISO VG 220 ulja bez EP aditiva ili hidrauličkog ISO VG 46 ulja sa sadržajem ZDTP aditiva.

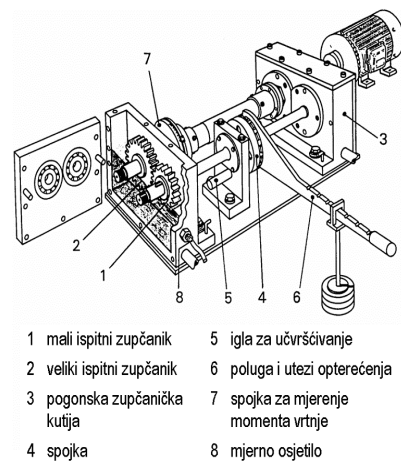
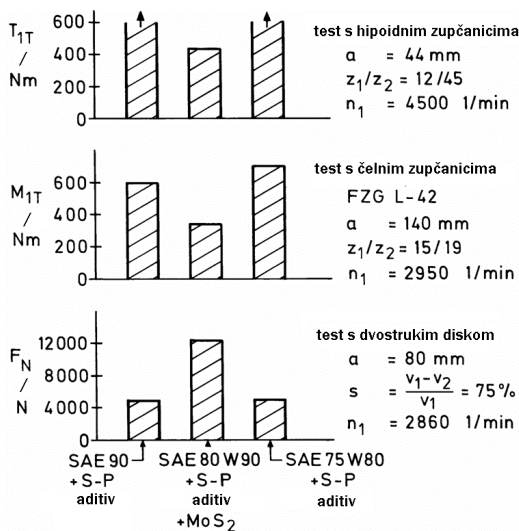


Slika 1: podjela ispitnih uređaja (shematski)

Slika 2: Rezultati zaribavanja za različita maziva [2]



Ispitivanje na FZG uređaju koje koristi ispitne zupčanike jedino daje ispravnu relativnu ocjenu ovih maziva. Čak rezultati dobiveni pomoću ispitnih uređaja s dvostrukim diskom s bliskom simulacijom dodira u jednoj točki na diobenoj kružnici mogu biti poprilično varljivi. Ocjenjivana su dva uobičajena ulja za hipoidne zupčaničke prijenosnike i jedno s dodatkom MoS₂ na testu s



Strelice označuju rezultate izvan ispitnog područja

Slika 3: Rezultati zaribavanja na disku i zupčaniku

Slika 4: FZG ispitni zupčanički uređaj

hipoidnim i čelnim zupčanicima te uređaju s dvostrukim diskom (slika 3). Dok su oba ispitivanja sa zupčanicima pokazala prilično loša radna svojstva za maziva s dodatnim sadržajem MoS₂ u iznosu manjem od 50 % od uobičajenih ulja, na uređaju s dvostrukim diskom taj rezultat je bio 300 %.

Uređaj za mehaničko ispitivanje i ispitni zupčanici

Na osnovi ovih iskustava razvijeni su brojni ispitni postupci za zupčanička maziva koristeći FZG ispitni uređaj s čelnim zupčanicima s vanjskim ozubljenjem kojih diljem svijeta ima preko 500 [3].

Uređaj za mehaničko ispitivanje

FZG zupčanički probni stol je ispitni uređaj s čelnim zupčanicima s vanjskim ozubljenjem s osnim razmakom $a = 91,5$ mm [4] (slika 4). Veliki i mali ispitni zupčanik su povezani dvjema osovinama. Jedna osovina je podijeljena spojkom na dva dijela. Jedna polovica spojke se može učvrstiti na postolje s iglom za učvršćivanje dok se druga polovica zakreće pomoću poluge i utega. Nakon zatvaranja spojke utezi mogu biti uklonjeni, a osovina otpuštena. Na sustav primijenjeni statički moment vrtnje putem okretanja kalibrirane torzijske osovine može se nadgledati pomoću mjerne spojke momenta vrtnje. Ispitni uređaj može raditi bilo s dvobrzinskim AC motorom pri 1500/3000 o/min ili s DC motorom s promjenjivom brzinom između 100 - 3000 o/min. Zupčanici se uobičajeno podmazuju u ispitnom kućištu uranjanjem s ogrjevnom i rashladnom spiralom za upravljanje temperaturom. S dodatnim sklopom za dobavu ulja također se može primijeniti podmazivanje raspršivanjem.

Ispitni zupčanici

Za različita normirana ispitivanja u uporabi postoje dvije normirane geometrije ispitnih zupčanika [3]. Za ispitivanje zaribavanja koristi se zupčanik vrste A s izrazitim klizanjem na vrhovima zuba malog zupčanika dok se za ispitivanje trošenja, mikrotočkaste i točkaste korozije koristi zupčanik vrste C s uravnoteženim klizanjem. Osnovni podaci o ispitnim zupčanicima su sažeti u tablici 1. Ispitni zupčanici su površinski kaljeni s površinskom tvrdoćom HRC = 60 + 2 i debljinom kaljenog sloja Eht = 0,6 - 0,9 mm. Površinska hrapavost je nadzirana do zahtijevane vrijednosti odgovarajućeg ispitnog postupka. Ispitne zupčanike proizvodi jedan proizvođač u šaržama od 100 parova, pažljivo nadzirući metalurška svojstva, geometrijsku točnost i površinsku obradu.

Ispitni postupci

Za različite načine oštećenja zupčanika uzrokovana vrstom maziva, viskoznošću i aditivnim sklopom razvijeni su bliskom suradnjom s indu-strijom odgovarajući ispitni postupci. U određenim slučajevima postoje različite preinake ispitnih postupaka prilagođenih specifičnoj primjeni. Nadalje su opisani najčešće korišteni postupci.

Ispitivanja sposobnosti podnošenja opterećenja zaribavanjem

Široko korišteni ispitni postupak za ocjenu svojstava zaribavanja indu-strijskih zupčaničkih maziva je FZG A/8.3/90 ispitni postupak prema DIN ISO 14635-1 [4], koji je istovjetan ostalim normama kao što su IP 334 [5], ASTM D-5182 [6], CEC L-07-A-95 [7] i jednak normi ISO DIS 14635-1 [8].

Tablica 1: Osnovni podaci o ispitnim zupčanicima

	simbol	jedinica	A-tip	C-tip
osni razmak	a	mm	91,5	
broj zubi zupčanika	mali	z_1	-	16
	veliki	z_2	-	24
modul	m	mm	4,5	
kut zahvata	α	°	20	
nagib boka zuba	β	°	0	
širina zuba	b	mm	20	14
faktor pomaka profila	mali	x_1	-	0,8532
	veliki	x_2	-	-0,5
diobeni promjer zupč.	mali	d_{w1}	mm	73,2
	veliki	d_{w2}	mm	109,8
vanjski promjer zupč.	mali	d_{a1}	mm	88,8
	veliki	d_{a2}	mm	112,5
materijal	MAT	-	20MnCr5	16MnCr5
toplinska obradba	-	-	površinsko kaljenje	

Zupčanci vrste A se opterećuju postupno u 12 koraka, između Hertzova pritiska $p_c = 150$ do 1800 N/mm^2 . Oni rade 15 minuta pri obodnoj brzini od $8,3 \text{ m/s}$ i početnoj temperaturi od 90°C za svaki stupanj opterećenja, u uvjetima podmazivanja uranjanjem bez hlađenja. Bokovi zuba se pregledavaju vizualnim putem nakon svakog stupnja opterećenja kako bi se utvrdili tragovi oštećenja zaribavanjem.

Tablica 2: Tipični rezultati normiranog testa zaribavanja

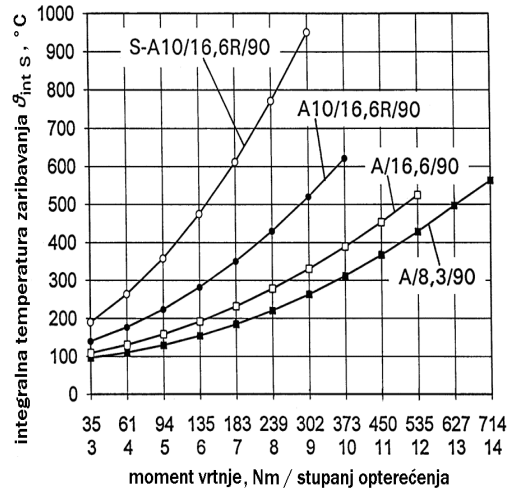
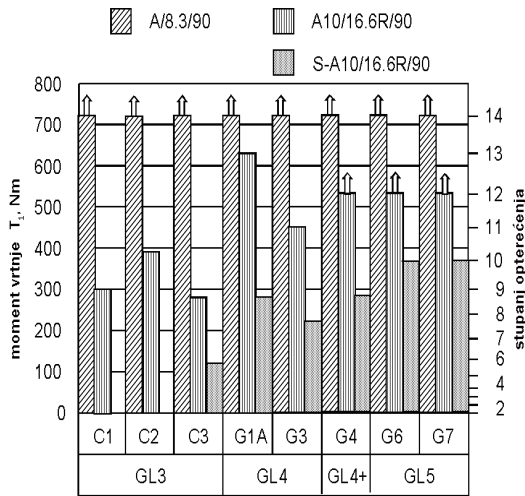
vrsta maziva	tipična ISO VG	tipični stupanj opterećenja		
		bez EP aditiva	blago EP aditivirano	EP ulje
ATF	32-46	2-4	5-8	9-11
turbinsko ulje	32-68	3-5	6-8	9-11
industrijsko zupčaničko ulje	100-320	5-7	8-12	>12
ulje za mjenjače	100-220	-	-	>12
ulje za osovine	150-220	-	-	>12

Stupanj štetnog opterećenja nastupa kada bokovi svih zubaca malog zupčanika pokazuju ukupno zbrojenu širinu oštećenih područja jednaku ili veću od širine pojedinog zupca. Prilikom gravimetrijskog ispitivanja zupčanci se skidaju i važu kako bi se odredio gubitak njihove mase. Iz krivulje koja prikazuje gubitak mase mogu se procijeniti specifični parametri trošenja kao i stupanj

štetnog opterećenja zaribavanjem koji je predstavljen povećanjem nagiba na krivulji trošenja. Tablica 2 prikazuje tipične rezultate zupčaničkog maziva na ovome testu. Očito je da za zahtjeve od najmanje API GL3 kao npr. u cestovnim vozilima ili turbinama pogonjenih vjetrom kao i primjene u motornim vozilima poput ručnih mjenjača gospodarskih vozila s API GL4 te stražnjih osovine s hipoidnim parom zupčanika s API GL5 zahtjevima, normirano ispitivanje predviđeno za industrijske primjene s izrazitim zaribavanjem nema dostatnu razlikovnu snagu.

Za zupčanička ulja za vozila razine API GL4 ne postoji prihvaćen ispitni postupak, za API GL5 ulja se može upotrijebiti CRC ili FZG L-42 test [9]. U sustavnim istraživanjima na normiranom FZG zupčaničkom ispitnom stolu rizik zaribavanja je

povećan promjenom brzine i specifičnog opterećenja, primjenom opterećenja i osjetila okretaja.



Slika 5: Rezultati zaribavanja za različita maziva Slika 6: Usporedba ispitnih postupaka zaribavanja

Razvijeni su Step test A10/16.6R/90 za maziva do razine kvalitete GL4 i Shock test S-A10/16.6R/90 za razlikovanje između GL4 i GL5. Ispitni zupčanici vrste A sa smanjenim čelom zuba malog zupčanika širine $b = 10$ mm (A10) se koriste pri povećanoj brzini od 16,6 m/s (16.6) i povratnim osjetilom vrtnje (R), pri temperaturi ulja od 90 °C (90). U Step testu opterećenje se povećava korak po korak do pojave zaribavanja. U Shock testu (S) zupčanici su izravno opterećeni u očekivanom stupnju opterećenja i ocjena se izražava kao ZADOVOLJAVA ili NE ZADOVOLJAVA. Detaljni opis ispitnih postupaka se može pronaći u FVA informacijskom listu [10].

Usporedbu rezultata različitih ispitnih postupaka za ocjenu zaribavanja prikazuje slika 5. Ovim testovima moguće je pokriti cijeli niz sposobnosti podnošenja opterećenja zaribavanja od API GL1 do API GL5. Osim relativnog rangiranja maziva s obzirom na njihova radna svojstva zaribavanja, rezultati ovih testova se također mogu preračunati na kritičnu temperaturu zaribavanja i uvrstiti u DIN [11] i ISO [12] norme. Na osnovi kritičnih temperatura zaribavanja, moguće je dati usporedbu različitih ispitnih postupaka kao što je i prikazano na slici 6.

Test trošenja pri malim brzinama

Chevron Test [13] za traktorska hidraulička ulja male viskoznosti obično ne može razlikovati različita zupčanička ulja za industriju ili vozila veće viskoznosti. Također je razvijen novi univerzalni test trošenja C/0.05/90:120/12

(tab. 2). Test točkaste korozije koristi zupčani

vrste C-PT (C) pri brzini malog zupčanika od 0,05 m/s (0.05) - što odgovara iznosu od 13 o/min malog zupčanika - pri temperaturi ulja od 90 i 120 °C (90:120) pri najvećem stupnju opterećenja 12 (12) - što odgovara vrijednosti momenta vrtnje malog zupčanika od $T_1 = 378,2$ Nm. Ispitni postupak se sastoji od dva dijela. Detaljni opis ispitnog postupka moguće je pronaći u DGMK informacijskom listu [14]. Za izvođenje testa normirani FZG ispitni stol mora biti preinačen ugradnjom usporivača između pogonskog motora i pogonske zupčaničke kutije.

1. dio: C/0.05/90/12 Izvodi se dva puta po 20 sati s međurazmacima za vaganje ispitnih zupčanika. Obodna brzina je $v = 0,05$ m/s, a temperatura ulja u ispitnom kućištu se održava na $\vartheta_{ulja} = 90^\circ\text{C}$. Ovi uvjeti daju najviše ocjene trošenja za sva ispitana maziva.

2. dio: C/0.05/120/12 Izvodi se dva puta po 20 sati s međurazmacima za vaganje ispitnih zupčanika. Temperatura ulja u ispitnom kućištu se povećava na $\vartheta_{ulja} = 120^\circ\text{C}$ dok se ostali parametri drže nepromijenjenim, kako bi se ispitala reakcija aditiva pri povišenoj temperaturi. Prva dva dijela se uvijek izvode za ispitivanje maziva, dok se 3. dio može pridodati kako bi se dobile detaljnije informacije za iste radne uvjete.

3. dio: C/0.05/90/12 ili C/0.05/120/12 ili C/0.57/90/12 3. dio se izvodi 40 sati bez međurazmaka za vaganje. C/0.05/90/12: Ponavljanje ispitnih uvjeta iz prvog dijela može pokazati kako promjenom radnih uvjeta može doći do značajnih mehaničkih i kemijskih promjena na površini bokova zubi. C/0.05/120/12: Ponavljanje ispitnih uvjeta iz drugog dijela može biti prikladno kada su radni uvjeti u praksi pretežno pri višim temperaturnim razinama i rezultati drugog dijela još nisu dovoljni ili još nisu dostigli postojanu razinu. C/0.57/90/12: Promjena obodne brzine na 0,57 m/s, što odgovara brzini malog zupčanika od $n_1 = 100$ o/min, može pokazati utjecaj većih brzina i većih debljina mazivog sloja te boljih uvjeta podmazivanja na trošenje. Odabrana je temperatura ulja od $\vartheta_{ulja} = 90^\circ\text{C}$, zato što u većini slučajeva pri nižim temperaturama dolazi do većeg trošenja.

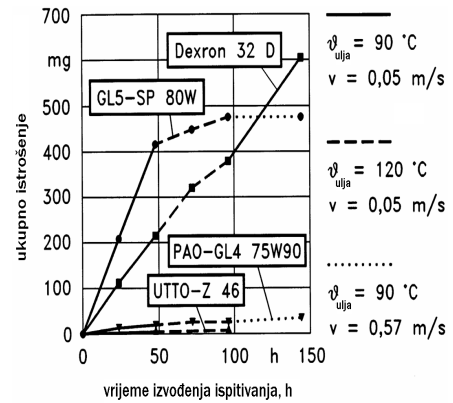
uvjeti ispitivanja	C/0,05/90/12	C/0,05/120/12	C/0,57/90/12
obodna brzina na diobenoj kružnici	0,05 m/s	0,05 m/s	0,57 m/s
brzina malog zupčanika	13 o/min	13 o/min	150 o/min
brzina velikog zupčanika	8,7 o/min	8,7 o/min	100 o/min
temperatura ulja	90 °C	120 °C	90 °C
moment vrtnje	378,2 Nm	378,2 Nm	378,2 Nm
vrijeme ispitivanja	2 x 20 h	2 x 20 h	1 x 40 h
brzina vrtnje osovine 2	2 x 10400	2 x 10400	1 x 240000
ispitni rezultat	gubitak mase malog i velikog zupčanika		

Tablica 3: ispitni uvjeti testa trošenja C/0,05/90:120/12

Različita maziva za zupčanike - hidraulička ulja, ATF ulja, turbinska ulja, zupčanička ulja za industriju i vozila GL4 i GL5 razine kvalitete su ispitivana pod navedenim uvjetima. Tipični ispitni rezultati su prikazani na slici 7 iz koje je vidljivo da se mogu pojaviti različite kategorije trošenja:

- veliko ili srednje istrošenje u oba dijela, 1. i 2. dio (npr. Dexron 32 D)
- veliko ili srednje istrošenje u 1. i malo istrošenje u 2. dijelu (npr. GL5-SP 80W)
- malo istrošenje u oba dijela, 1. i 2. dio (npr. UTTO-Z 46)

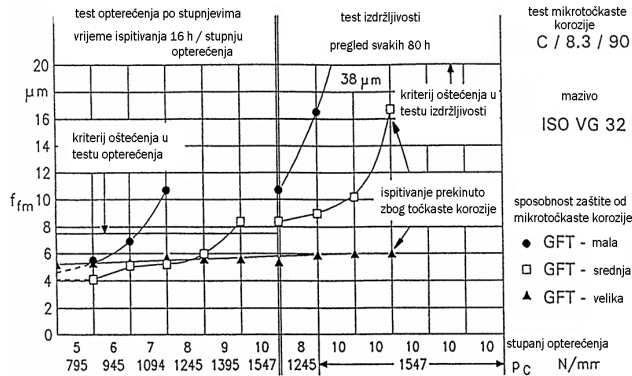
Predviđanje rezultata trošenja temeljem parametara viskoznosti ili sadržaja aditiva nije moguće. Eksperimentalni rezultati testa trošenja se mogu uvrstiti kao specifične vrijednosti istrošenja c_{it} u računski postupak trošenja prema Pleweu [15].



Slika 7: Rezultati FZG testa trošenja

Test mikropitinga ili mikrotočkaste korozije

Za male gubitke uzrokovane naglim kretanjima i visoku djelotvornost često se koriste maziva male gradacije viskoznosti. Kako bi nadomjestili gubitak radnih svojstva zaribavanja i trošenja uzrokovanih nižom viskoznošću upotrebljavaju se različiti aditivi protiv trošenja i EP aditivi u velikim koncentracijama. Vrsta baznog ulja i aditiva pokazuje



Slika 8: Tipični rezultati testa mikropitinga

značajan utjecaj na oštećenje zupčanika uzrokovano mikropitingom ili mikrotočkastom korozijom [16]. Za procjenu radnih svojstava mikrotočkaste korozije maziva utemeljen je normirani ispitni postupak GF-C/8.3/90. Ispitivanje zahtijeva uređaj za raspršivanje ulja sa stalnom temperaturom ulja od $\vartheta_{ulja} = 90$ °C (90), pri protoku od $V = 2$ l/min. Zupčanik vrste C s navedenom velikom površinskom hrapavošću $R_a = 0,5 \pm 0,1$ µm (GF-C) radi pri obodnoj brzini od $v = 8,3$ m/s (8.3). Nakon jednog sata urađivanja pri stupnju opterećenja 3 ($p_C = 500$ N/mm²) slijedi kratkotrajno ispitivanje pri stupnjevima opterećenja od 5 do 10 ($p_C = 800 - 1500$ N/mm²). Vrijeme izvođenja ispitivanja je 16 h po stupnju opterećenja. Nakon svakog

stupnja opterećenja zupčanici se skidaju i mjeri se odstupanje profila. Ako je došlo do promjene profila u iznosu od $7,5 \mu\text{m}$ (što odgovara promjeni DIN točnosti s 5 na 6), ispitivanje se prekida, dosegnut je stupanj štetnog opterećenja.

U slučaju oštećenja pri stupnju opterećenja 8, 9, 10 ili preko 10 izvodi se test izdržljivosti s istim parom zupčanika, i to 80 h pri stupnju opterećenja 8, nakon čega slijede najviše 5 puta 80 h pri stupnju opterećenja 10. Zupčanici se pregledavaju nakon svakog ispitnog slijeda te se nanovo mjeri odstupanje profila. Kada odstupanje profila prekorači $20 \mu\text{m}$ (što odgovara promjeni DIN točnosti na 9) ili se pojavi veliki piting ili točkasta korozija, test izdržljivosti se prekida. Detaljni opis ispitnog postupka moguće je pronaći u [17]. Slika 8 pokazuje primjere maziva s različitom sposobnošću zaštite od mikrotočkaste korozije.

Zbog vrlo dugog vremena izvođenja ispitivanja normiranog testa mikropitinga ili mikrotočkaste korozije, a u svrhu dodatne provjere, razvijen je kratki test mikrotočkaste korozije GFKT-C/8,3/90 [18]. Ispitivanje se izvodi u uvjetima podmazivanja uranjanjem skraćenim Step test postupkom. Nakon jednog sata urađivanja pri stupnju opterećenja 3 slijedi 16 h za svaki stupanj, 7. i 9. Ispitni rezultat je utvrđivanje razreda mikropitinga ili mikrotočkaste korozije. Ukoliko nakon sedmog stupnja odstupanje profila, kao kriterij oštećenja prekorači iznos od $7,5 \mu\text{m}$, mazivo se ocjenjuje s malom sposobnošću zaštite od mikrotočkaste korozije.

Ukoliko se iznos od $7,5 \mu\text{m}$ prekorači nakon devetog stupnja, ocjena sposobnosti zaštite od mikrotočkaste korozije je osrednja, a ako taj iznos nakon devetog stupnja opterećenja bude manji od $7,5 \mu\text{m}$, sposobnost zaštite od mikrotočkaste korozije je velika. Usporedba rezultata normiranog testa i kratkog testa mikrotočkaste korozije pokazuje dobru korelaciju (slika 9).

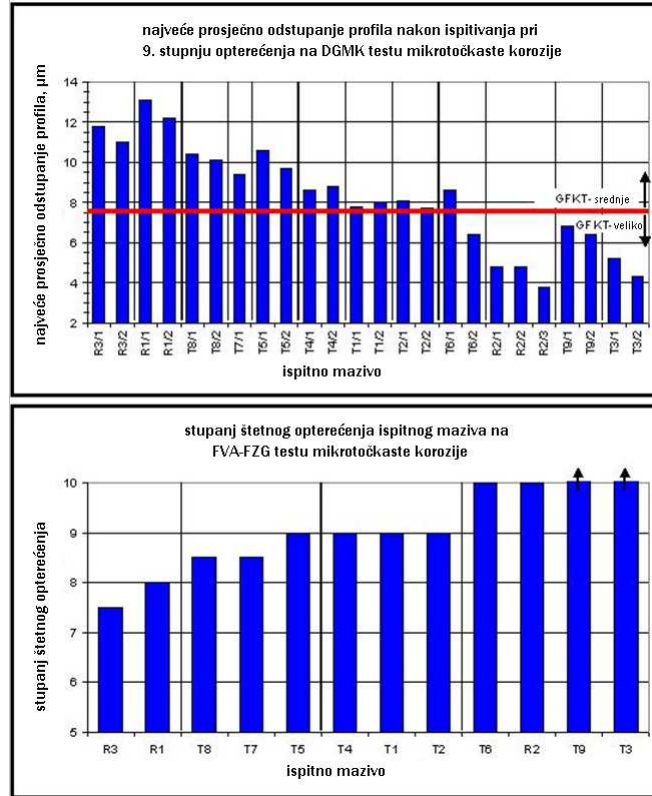
Predviđanje rezultata mikrotočkaste korozije temeljem parametara viskoznosti ili sadržaja aditiva nije moguće. Eksperimentalni rezultati se mogu uvrstiti u postupak ocjene sposobnosti zaštite od mikrotočkaste korozije prema Schradeu [19].

Test pitinga ili točkaste korozije

Vrsta maziva, viskoznost i aditivni sklop utječu na životni vijek zupčanika s obzirom na pojavu pitinga ili točkaste korozije. Za ulja za zupčaničke prijenosnike vozila posebno je razvijen test s jednostrukim stupnjem opterećenja PT-C/9:10/90 kojim je moguće ocijeniti relativni životni vijek zupčanika s obzirom na pojavu točkaste korozije. Ispitivanje ulja u testu točkaste korozije zahtijeva najmanje stupanj posljednjeg stupnja opterećenja 9 ($p_c = 1350 \text{ N/mm}^2$). U suprotnom će doći do zaribavanja zupčanika u uvjetima ispitivanja točkaste korozije.

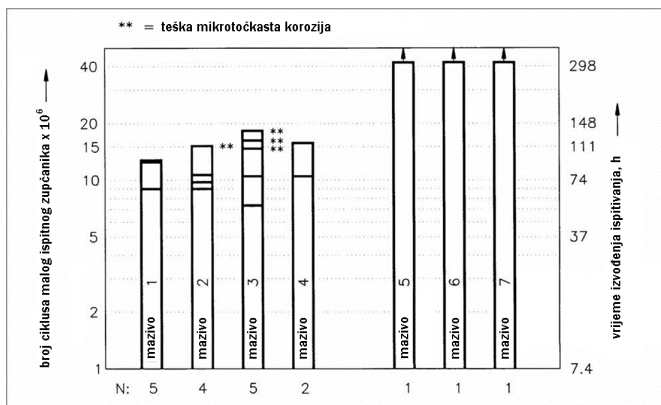
Zupčanik vrste C s malom površinskom hrapavošću od $R_a = 0,3 \pm 0,1 \mu\text{m}$ (PT-C) pogoni se pri obodnoj brzini $v = 8,3 \text{ m/s}$ i stupnju opterećenja 9 za zupčanička ulja male viskoznosti ispod VG 100, a pri stupnju opterećenja 10 za zupčanička ulja srednje i velike viskoznosti VG 100 ili više (9:10). Zupčanici se podmazuju uranjanjem pri stalnoj temperaturi ulja $\vartheta_{ulje} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ (90). Rashladna spirala s vodom je pričvršćena na gornji pokrov ispitnog kućišta.

Nakon dva sata urađivanja pri stupnju opterećenja 6 ($p_C = 1100 \text{ N/mm}^2$) slijedi ispitivanje pri određenom stupnju opterećenja sve do postizanja kriterija oštećenja. Kriterij oštećenja je uobičajeno 4 % točkastog područja na boku zuba malog ispitnog zupčanika. U izvještaj se unose brojni ciklusi opterećenja sve do pojave oštećenja i uspoređuje sa životnim vijekom referentnog ulja. Zbog velikog raspršenja rezultata životnog vijeka zupčanika s obzirom na pojavu pitinga ili točkaste korozije, potrebno je provesti najmanje tri ispitivanja s istim mazivom kako bi se dobio statistički prihvatljiv rezultat. Za životni vijek zupčanika s obzirom na pojavu točkaste korozije pretpostavlja se Weibullova distribucija, a u izvještaj se unosi ciklus opterećenja za 50 % (L50) vjerojatnosti oštećenja [20]. Vrijednost se uspoređuje s L50 vrijednostima referentnih maziva. Slika 10 pokazuje rezultate različitih zupčaničkih maziva u normiranom testu s jednostrukim stupnjem opterećenja PT-C/9/90.



Slika 9: Rezultati kratkog i normiranog testa mikrotočkaste korozije

Na rezultat normiranog testa točkaste korozije često snažno utječe pojava mikrotočkaste korozije. Također je razvijen svrhovit PTX-C/10/90 test točkaste korozije koji koristi preinačene ispitne zupčanike PTX-C s površinama vrha i korijena zuba kao i cijelog ozubljenja zupčaničkog kola ispitnih zupčanika obrađenim superfiniš postupkom, a u svrhu sprječavanja mikrotočkaste korozije. Test primjene PTX-C/SNC/90 [21] proširuje ispitni postupak na dvije različite razine opterećenja ovisno o rezultatu testa s jednostrukim stupnjem opterećenja pri stupnju opterećenja 10. Ukoliko je srednja vrijednost životnog vijeka zupčanika s obzirom na pojavu točkaste korozije triju ispitivanja pri stupnju opterećenja 10 jednaka ili manja od 15 milijuna ciklusa malog ispitnog zupčanika, potrebno je napraviti još najmanje dva

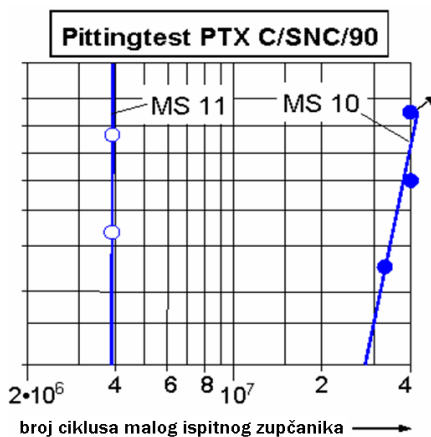


dodatna ispitivanja pri stupnju opterećenja 9. Ako je rezultat pri stupnju opterećenja 10 veći od 15 milijuna ciklusa, potrebno je napraviti ispitivanje pri stupnju opterećenja 11. Slika 11 prikazuje rezultat maziva u testu primjene.

N: broj ispitivanja za svako mazivo

Slika 10: Rezultati pitinga ili točkaste korozije za različita maziva pri 9. stupnju opterećenja

Rezultati ispitivanja testa pitinga se mogu uvrstiti u ISO računski postupak



definiranjem nove SN-krivulje usporedbom s referentnom SN krivuljom za ulje bez EP aditiva iste viskoznosti. Pristup je vrlo konzervativan zato što se razina izdržljivosti drži stalnom. Poboljšanja su također izračunata samo za par zupčanika s ograničenim životnim vijekom.

Zaključak

U radu su opisani normirani FZG ispitni stol s čelnim zupčanicima s vanjskim ozubljenjem kao i zahtijevane preinake za određene vrste ispitivanja. Opisana je norma i normirani ispitni postupci za ocjenu utjecaja maziva na oštećenje zupčanika zaribavanjem, trošenjem, mikropitingom ili mikrotočkastom i pitingom ili točkastom korozijom. Prikazani su i ispitni rezultati različitih ulja za zupčanike

Slika 11: Rezultati testa primjene

dostupnih na tržištu i njihov unos u računske postupke.

Literatura

1. Höhn, B.-R., Michaelis, K. and Doleschel, A. "Limitations of Bench Testing for Gear Lubricants", *ASTM STP 1404: Bench Testing of Industrial Fluid Lubrication*, West Conshohocken, PA, 2001.
2. Wirtz, H. "Schmierstoffe und anwendungsbezogene Schmierstoffprüfung", *Vortrag Technische Akademie Wuppertal*, 1980.

3. Höhn, B.-R., Oster, P. and Michaelis, K. "Influence of Lubricant on Gear Failures - Test Methods and Application to Gearboxes in Practice", *Tribotest journal* 11-1, Sept. (2004).
4. DIN ISO 14635-1 "Zahnräder - FZG-Prüfverfahren - Teil 1: FZG-Prüfverfahren A/8,3/90 zur Bestimmung der relativen Fresstragfähigkeit von Schmierölen".
5. IP 334 "Determination of Load Carrying Capacity of Lubricants, FZG Gear Machine Method".
6. ASTM D-5182 "Standard Test Method for Evaluating the Scuffing (Scoring) Load Capacity of Oils".
7. CEC L-07-A-95 "FZG Gear Machine: Load Carrying Capacity Test for Transmission Lubricants".
8. ISO 14635-1 "Gears – FZG test procedures - Part 1: FZG test method A/8,3/90 for relative scuffing load-carrying capacity of oils".
9. Winter, H. and Michaelis, K. "Scoring Load Capacity of EP-Oils in the FZG L-42 Test", *Fuels and Lubricants Meeting*, Toronto, Oct. 18-21, 1982, *SAE Technical Paper Series* 821183, S. 1-7.
10. FVA Information Sheet No. 243 "Scuffing Test EP-Oils, Method to Assess the Scuffing Load Capacity of Lubricants with High EP Performance Using an FZG Gear Test Rig", Nov. 1995.
11. DIN 3990, Teil 4 "Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern: Berechnung der Freßtragfähigkeit".
12. ISO DTR 13989 "Calculation of Scuffing Load Capacity of Cylindrical, Bevel and Hypoid Gears".
13. ASTM Standard D 4998-89 "Standard Test Method for Evaluating Wear Characteristics of Tractor Hydraulic Fluids".
14. DGMK Information Sheet No. 377 "Method to Assess the Wear Characteristics of Lubricants in the FZG Gear Test Rig", *Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.*, 1996.
15. Plewe, H.-J. "Untersuchungen über den Abriebverschleiß von geschmierten, langsam laufenden Zahnradern". *Diss. TU München*, 1980.
16. Winter, H. and Oster, P. "Influence of the Lubricant on Pitting and Micro Pitting (Grey Staining, Frosted Areas) Resistance of Case Carburized Gears - Test Procedures", *AGMA Technical Paper* 87FTM10.
17. FVA Information Sheet No. 54/I-IV "Test procedure for the investigation of the micro-pitting capacity of gear lubricants", July 1993.
18. DGMK Information Sheet: Short Test Procedure for the micropitting load capacity of gear lubricants. 2005.
19. Schrade, U. "Einfluß von Verzahnungsgeometrie und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben", *Diss. TU München*, 1999.
20. FVA Information Sheet No. 2/IV "Influence of Lubricant on the Pitting Capacity of Case Carburized Gears in Load-Spectra and Single-Stage-Investigations", July 1997.
21. FVA Information Sheet No. 371 "Practice Relevant Pitting Test", October 2003.
22. ISO DIS 6336 "Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears".

UDK	ključne riječi	key words
620.22.05	metode ispitivanje maziva ispitnim uređajem	lubricant rig testing methods
621.892.094	maziva za zupčaničke prijenosnike	gear lubricants
620.1.05	FZG ispitni uređaj	FZG gear lubricants testing rig

Autori

Bernd-Robert Hoehn, Peter Oster, Thomas Tobie, Klaus Michaelis
 e-mail: michaelis@fzg.mw.tum.de; Gear Research Centre FZG, Technische
 Universität München

Primljeno

19.9.2007.