

Boris Kržan, Mitjan Kalin, Jože Vižintin

ISSN 0350-350X

GOMABN 47, 4, 281-298

Izvorni znanstveni rad/Original scientific paper

UDK 539.375.6 : 621.385.6 : 546.78 : 546.26-162 : 621.892.2 : 621.892.28

## TRIBOLOŠKO PONAŠANJE ZUPČANIK A S VOLFRAM-DLC PREVLAKOM

### Sažetak

Razvoj novih prijenosa i prijenosnika karakterizira povećana razina okretnog momenta i snage, veća učinkovitost, dulji vijek trajanja, dulje razdoblje do potrebe popravka, smanjena količina maziva te povećani zahtjevi glede buke i zaštite okoliša. Okoliš, kao novi čimbenik u procesu dizajniranja, doprinosi tome da se proizvod usavrši na način da se unaprijed izbjegnu problemi po okoliš. Prevlačenje površine jedna je od tehnologija budućnosti za poboljšanje radnih svojstava površinski kaljenih zupčanika.

Glavni ograničavajući čimbenik širenju korištenja tvrdih prevlaka pri primjeni na dijelovima strojeva jest nedostatak znanja o tome kako se te inertne prevlake ponašaju u uvjetima podmazivanja kada se koriste suvremena maziva koja su prvenstveno osmišljena za kontakt čelik/čelik. Utjecaj maziva na osnovi estera na svojstva otpornosti prema trošenju ispitnih zupčanika s volfram-DLC prevlakom izmjeren je postupkom nenormiranog FZG testa. Svojstva maziva na osnovi estera su ispitana u usporedbi s uobičajenim zupčaničkim mineralnim uljem. Rezultati pokazuju da u prikazanim uvjetima zupčanici s volfram-DLC prevlakom mogu omogućiti zadovoljavajuću otpornost na trošenje za umjerena opterećenja.

### 1. Uvod

Općenito uređaji za prijenos snage koriste maziva na osnovi baznih ulja dobivenih iz nafte. S ubrzanim napretkom konstrukcija zupčanika i proizvodne tehnologije, prijenosnici su postali manji, a njihova se izlazna snaga značajno povećala. Rezultati su veće naprezanje dodirnih površina, uz veće brzine i manje količine maziva. Sa smanjenom količinom ulja, mazivo mora omogućavati potrebno podmazivanje pri višim radnim temperaturama, učinkovitije hlađenje i suspenziju onečišćivača. Stoga odabir maziva boljih radnih svojstava postaje sve važniji.

Štoviše, pri korištenju maziva postoji očiti trend uporabe onih koji manje zagađuju okoliš.

Trenutačno stajalište jest da se osiromašenje dostupnih izvora i povećano zagađenje okoliša u narednih pedeset godina ne mogu nastaviti na isti način kao što je to bilo proteklih pedeset godina, bez drastičnog utjecaja na kvalitetu života. Korištenje maziva koja su prilagođena okolišu jedna je od strategija podmazivanja s ciljem izbjegavanja onečišćenja. Vrlo dobre ili čak nadmoćne tehničke performanse nekih estera u kombinaciji s ekološkim prihvatljivim svojstvima omogućuju formulaciju maziva visokih performanci s iznimno niskom stopom isparavanja, s vrlo visokim indeksom viskoznosti i dobrim graničnim karakteristikama podmazivanja.

Diesteri, polioli i složeni esteri su biorazgradljivi u uvjetima jedne od međunarodno priznatih metoda ispitivanja a imaju i nisku toksičnost u vodi. Njihova dodatna prednost je to što ih se djelomično može dobiti iz obnovljivih izvora, uključujući biljna ulja i životinjske masnoće. S ekološkog stajališta izgledi za korištenje obnovljivih sirovina su prihvatljivi, uz uvjet da se koristi potpuni potencijal prirodnih sinteza pomoću Sunčeve energije. Proizvodnja biljnih ulja čini ciklus u kojem nema ispuštanja ugljičnog dioksida u atmosferu. [1,2].

Tijekom proteklih godina učinjen je značajan napredak u razvoju naprednih prevlaka korištenih u tribološkoj tehnologiji. Jedinstvena tribološka svojstva sloja dijamantu sličnog ugljika (DLC) kao što su nisko trenje, visoka otpornosti na trošenje i niska temperatura nanošenja, učinila su ga vrlo privlačnim za primjenu na strojnim elementima. DLC slojevi prevučeni metalom (Me-C:H) imaju svoje prednosti pred čistom prevlakom na osnovi ugljika budući da je smanjeno unutrašnje naprezanje, te je poboljšano prijanjanje uz čeličnu podlogu. Osim na alatima i matricama, dijamantu slični ugljik i slične prevlake pronalaze svoju primjenu i na nekim mehaničkim dijelovima uključujući ležajeve i zupčanike. Oni omogućuju veliko produljenje vijeka trajanja i smanjenje gubitaka zbog trenja na strojnim dijelovima [3,4].

Ovim radom pokušavamo sjediniti odlična svojstva trenja kod volfram-DLC prevlake sa sposobnošću podmazivanja maziva na osnovi estera radi poboljšanja radnih svojstava zupčanika. Provedena su ispitivanja na prilagođenom FZG ispitnom uređaju kako bi se istražila i usporedila svojstva sprječavanja zaribavanja čeličnih zupčanika bez prevlake i zupčanika s volfram-DLC prevlakom, podmazanih konvencionalnim zupčaničkim mineralnim uljem i ekološki prihvatljivom formulacijom na osnovi estera.

## 2. Ispitivanje

### 2.1 Oprema za ispitivanje

Ispitivanja zupčanika izvođena su na FZG ispitnom zupčaničkom sklopu. Uvjeti ispitivanja bili su slični normiranom postupku za ispitivanje svojstava opterećenja maziva u skladu s ISO DIS 14 635-1 [5].

Ispitna ulja bila su pod opterećenjem, koje je povećavano u 12 stupnjeva, određenih spomenutom normom. Svaki stupanj opterećenja trajao je 20 minuta (29000 okretaja motora) pri stalnoj brzini vrtnje vratila pogonskog zupčanika od 1450 o/m. Početna temperatura uljne kupke u svakoj fazi opterećenja iznosila je 50 °C i mogla se slobodno dizati tijekom ispitivanja. Kako se produljilo trajanje faza opterećenja s obzirom standardni A/8.3/90 ispitni postupak, ukupni rad koji su ispitni zupčanici izvršili do kraja faze opterećenja bio je 25 % veći. Na kraju posljednje faze opterećenja, ukupni rad koji su ispitni zupčanici izveli iznosio je 184 kWh.

Površina bokova zuba zupčanika je promatrana nakon svake faze opterećenja radi povećanja oštećenja u vidu specifičnih zarezata i pojačanog trošenja. Jednako tako, masa ispitnih zupčanika mjerena je u miligram točnosti nakon svakog trećeg stupnja opterećenja.

Metoda korištena za kvantitativnu procjenu koncentracije čestica trošenja bila je DR ferografija s izravnim očitanjem (Direct Reading). Ferografija je vrsta analize iz tehnologije ispitivanja ulja koja pomoću magnetske sile odvaja čestice iz maziva. Pomoću DR trend rezultata može se ustanoviti trošenje podmazivanog sustava. Pored toga, čestice trošenja iz nekih uzoraka ulja su izdvojene i pripremljene za mikroskopska ispitivanja. Promatranjem ovih čestica bikromatskim mikroskopom mogu se utvrditi nepravilnosti trošenja.

## 2.2 Ispitni zupčanici

Korišteni su standardni FZG ispitni zupčanici tipa "A" s ravnim zubima. Ispitni zupčanici su izrađeni s pomakom velikog profila, što povećava njihovu osjetljivost prema oštećenju kao rezultatu adhezivnog trošenja.

Ispitni zupčanici bez prevlake načinjeni su od čelika DIN 20MnCr5 i poboljšani cementiranjem ugljikom. Tvrdća površine nakon toplinske obrade iznosila je 60 do 62 HRC, a dubina sloja 0,6 do 0,9 mm. Površinska hrapavost iznosila je  $Ra=0,35 \mu\text{m}$  za pogonski zupčanik i  $Ra=0,30 \mu\text{m}$  za ispitni zupčanik.

Volfram-DLC prevlake su nanese na poboljšane zupčanike s ravnim zubima tipa "A" magnetronskim postupkom naštrcavanja pri temperaturi podloge od oko 200 °C. Mikrotvrdća iznosila je oko 1200 HV. Primarni sastojci prevlake uključivali su W, C i H sa Cr koji je upotrijebljen kao prijanjajući sloj. (150 nm). Debljina sloja volfram-DLC prevlake iznosila je tipično 1  $\mu\text{m}$  na korijenu zupca zupčanika i 2  $\mu\text{m}$  na tjemenu.

## 2.3 Maziva

Kao ispitna maziva korištene su formulacije na osnovi složenog estera i uobičajeno zupčaničko ISO VG 68 mineralno ulje. Fizička svojstva ispitnih maziva prikazana su na tablici 1. Zasićeni složeni ester je sačinjen od višefunkcijskog sintetskog alkohola, nekih petrokemijskih di-kiselina i kratkolančanih (C8-C10) masnih kiselina prirodnog porijekla. Složeni ester primijenjen kao bazno ulje gotovo je netoksičan za vodene mikroorganizme te je, sukladno OECD 202 metodi, klasificiran kao relativno neopasan. Primarna biorazgradnja prema CEC-L-33-A-93 testu iznosila je 76,7 %, a

konačna biorazgradnja prema OECD 301F testu 62,2 %. Rezultati biorazgradnje ukazuju na materijal koji se može brzo i značajno biološki razgraditi u okolišu.

Esteri su sami po sebi dobra granična maziva. Međutim, ipak su nužni neki aditivi radi poboljšanja radnih svojstava. Odabran je sustav aditiva koji se zasniva na bespepelnim sastojcima s blagim EP svojstvima dobivenim kemijom organski vezanog fosfora. EP aditiv je bioaminski neutralizirani ester fosforne kiseline, uobičajeni EP aditiv opće namjene. Aditiv protiv trošenja (AW) bio je dialkil ditiofosfat ester. Svaki aditiv je izmiješan sa složenim esterom u koncentraciji od 1 % (mas).

Tablica 1: Svojstva formulacija na osnovi mineralnog ulja i estera

Svojstvo	Jedinica	Metoda ispitivanja	Mineralno ulje	Estersko ulje
Gustoća pri 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	ISO 12185	887	921
Viskoznost pri 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	68	48
Viskoznost pri 100 °C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	8,6	8,0
Indeks viskoznosti		ISO 2909	96	138

Temeljem preporuke proizvođača, referentno ulje na osnovi mineralnog ulja je preporučeno za teško opterećene prijenosnike koji imaju metalurški poboljšanu površinu. Viskoznost mineralnog ulja viša je za jedan ISO stupanj viskoznosti u usporedbi s uljem na osnovi estera kako bi se nadoknadio učinak razlike u indeksu viskoznosti, tako postižući otprilike istu vrijednost viskoznosti za ulja pri radnoj temperaturi (tablica 1) koja je otprilike iznosila oko 100 °C pri ve ćim opterećenjima.

### 3. Rezultati

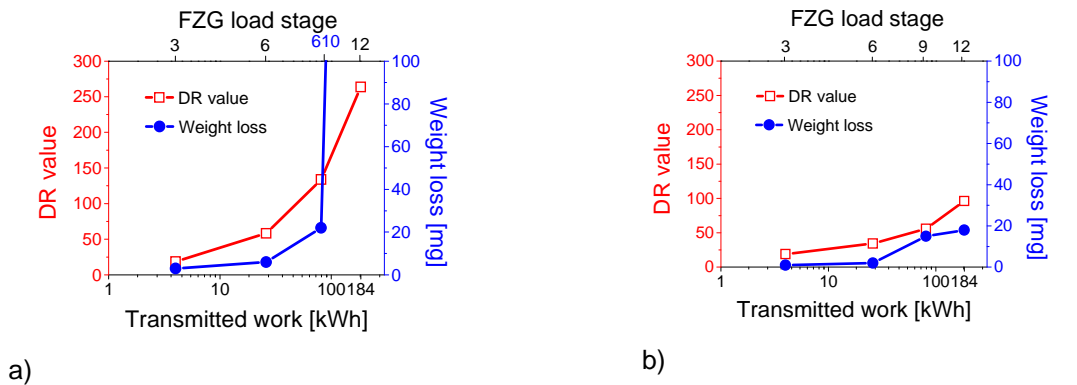
Kao najjasnija metoda prikazivanja rezultata trošenja odabran je kumulativni prikaz gubitka težine ispitnih zupčanika i koncentracije čestica trošenja na istoj slici u odnosu na ukupni izvršeni rad i stupanj opterećenja na FZG ispitnom uređaju.

Rezultati ispitivanja zaribavanja za ispitne čelične zupčanike prikazani su na slici 1. Očito je da je sposobnost podnošenja opterećenja zaribavanja formulacije estera viša u usporedbi s formulacijom mineralnog ulja. Kod mineralnog ulja gubitak težine kod ispitnih zupčanika kreće se unutar prihvatljivih granica sve do 140 kWh ukupnog izvršenog rada. Pri 184 kWh kumulativni gubitak težine za pogonski i ispitni zupčanik iznosi 610 mg, a svi bokovi pogonskog zupčanika su oštećeni. Kod formulacija na osnovi estera gubitak težine ispitnih zupčanika je mnogo manji. Nakon ispitivanja kumulativni zbroj iznosi samo 18 mg, te je uočeno samo nekoliko zarezna na diobenoj liniji. Rezultati mjerenja koncentracije čestica trošenja slijede tendenciju gubitka težine zupčanika kod oba ulja. Stupanj koncentracije čestica trošenja za mineralna ulja pokazalo je prilično visoke vrijednosti, osobito nakon šestog stupnja opterećenja.

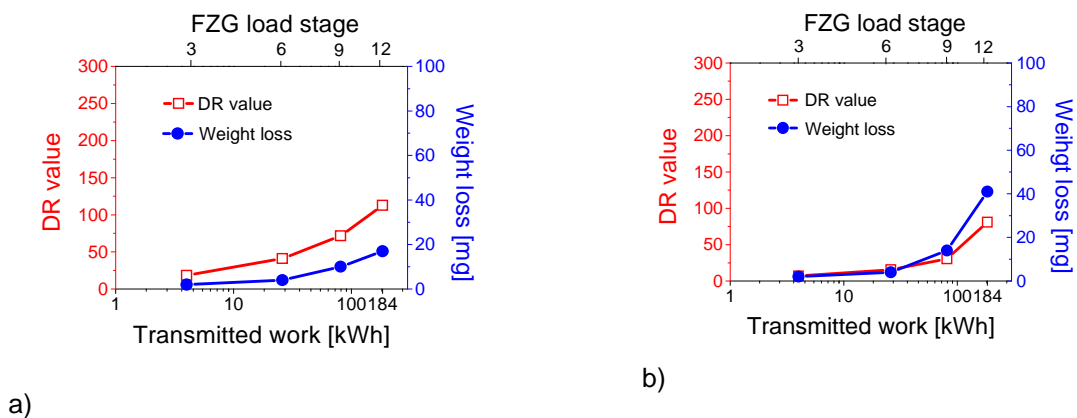
Primjena formulacije na osnovi estera pokazuje veći gubitak težine, dok je koncentracija čestica trošenja manja u usporedbi s formulacijom na osnovi

mineralnog ulja. Kod formulacije s esterom tragovi zaribavanja postaju vidljivi nakon 8 kWh obavljenog rada i počinju na korijenu a kasnije na vrhu zuba. Nakon 15 kWh većina bokova zubaca pogonskog zupčanika je ispolirana.

Slika 1: Rezultati mjerenja trošenja za čelične zupčanike bez prevlake: a) podmazani formulacijom mineralnog ulja, b) podmazani formulacijom estera



Slika 2: Rezultati mjerenja trošenja za zupčanike s volfram-DLC prevlakom: a) podmazani formulacijom mineralnog ulja, b) podmazani formulacijom estera

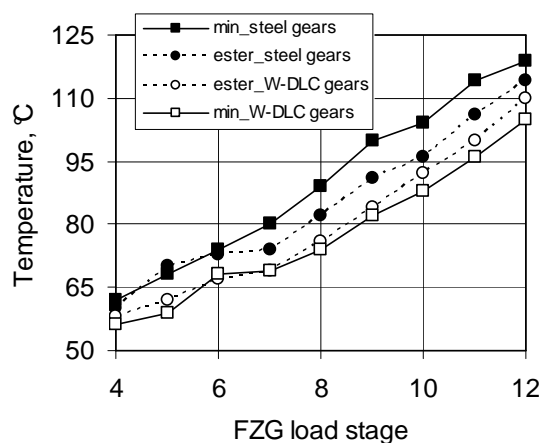


Prvo probijanje na volfram-DLC prevlaci uočeno je pri korijenu zuba pogonskog zupčanika nakon 26 kWh prenesenog rada. Kod formulacije na osnovi mineralnog ulja probijanje prevlake počelo je u isto vrijeme nakon 26 kWh prenesenog rada, ali vidljiva oštećenja bila su naglašenija. Oštećivanja su se nastavila u sljedećim

stupnjevima ispitivanja kod oba ulja. Nakon ispitivanja bokovi zuba pogonskog zupčanika bili su ispolirani, a volfram-DLC prevlaka potpuno istrošena na podnožju zuba. Rezultati trošenja za zupčanicima s volfram-DLC prevlakom prikazani na slici 2 pokazuju lagani, progresivni porast gubitka težine ispitnih zupčanika i koncentracije čestica trošenja za oba ulja.

Slika 3 pokazuje porast temperature uljne kupke na kraju svakog stupnja opterećenja zaribavanja za oba ulja s čeličnim zupčanicima bez prevlake i zupčanicima s volfram-DLC prevlakom. Temperatura polako raste povećanjem opterećenja za kombinacije ulja i materijala. Ispitivanja zupčanika s volfram-DLC prevlakom pokazala su niže temperature, što ukazuje da materijal površine boka zuba više utječe na porast temperature nego korišteno mazivo. Najniža temperatura uljne kupelji izmjerena je za zupčanicima s volfram-DLC prevlakom podmazanima formulacijom mineralnog ulja.

Slika 3: Temperatura uljne kupke nakon završetka faze opterećenja

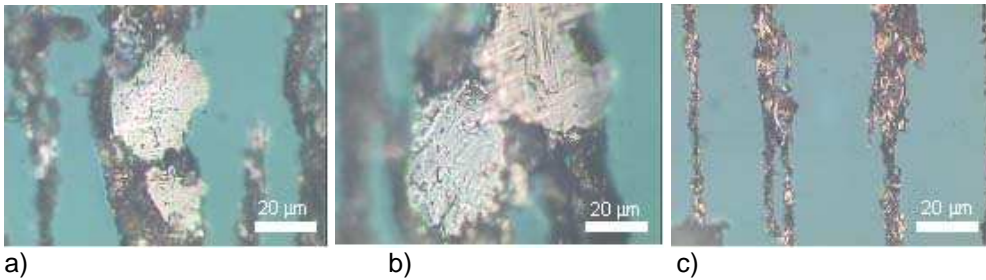


#### 4. Rasprava

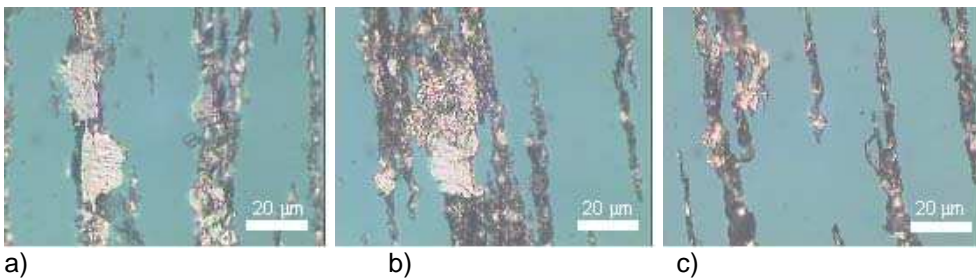
Rezultati trošenja za formulaciju mineralnog ulja ukazuju da na količinu struganja znatno utječe materijal površine ispitnih zupčanika (slike 1a i 2a). Kombinacija mineralnog ulja i čeličnog zupčanika pokazuje najveće trošenje. Promatranje bokova zuba pogonskog zupčanika ukazuje na oštećenje na 12. stupnju opterećenja nakon 184 kWh prenesenog rada. S druge strane, mineralno ulje u kombinaciji sa zupčanicom s volfram-DLC prevlakom pokazuje znatno nižu vrijednost trošenja i prošlo je 12. stupanj opterećenja. Suprotno tome, pri korištenju formulacije na osnovi estera rezultati trošenja za čelične zupčanicima i zupčanicima s volfram-DLC prevlakom su usporedivi i niže su razine.

Dodatne informacije o načinu i mehanizmu trošenja mogu biti dobivene analizom čestica trošenja. Čestice trošenja su konačni proizvod oštećenja površine, te njihov oblik, morfologija, veličina i koncentracija mogu pružiti neke informacije o načinu i mehanizmu trošenja. Čestice trošenja se najprije fiksiraju na predmetno stakalce i potom analiziraju pod optičkim mikroskopom.

Slika 4: Ulazna zona predmetnog stakalca izlučena iz mineralnog ulja, uvećano 500 puta. a) čelični zupčanici bez prevlake; b) zupčanici s volfram-DLC prevlakom; c) zupčanici s volfram-DLC prevlakom – najveće čestice trošenja



Slika 5: Ulazna zona predmetnog stakalca izlučena iz formulacije estera, uvećano 500 puta. a) čelični zupčanici bez prevlake; b) zupčanici s volfram-DLC prevlakom; c) zupčanici s volfram-DLC prevlakom – najveće čestice trošenja



Slika 4 prikazuje čestice izlučene iz formulacije mineralnog ulja, a slika 5 prikazuje čestice izlučene iz formulacije estera nakon 146 kWh ukupnog izvršenog rada, što je istovjetno 11. stupnju opterećenja na prilagođenom FZG uređaju. Slike 4a, 4b, 5a i 5b predstavljaju tipične čestice trošenja iz ulazne zone na staklenoj pločici. Čestice na ovom mjestu su obično najveće čestice odvojene iz ulja zato što je magnetska sila, koja privlači čestice, proporcionalna njenom volumenu a otpor gibanja kroz tekućinu proporcionalan površini presjeka čestice. Uspoređujući fotografije, jasno je da su čestice trošenja dobivene pri ispitivanju zupčanika s volfram-DLC prevlakom veće od čestica trošenja kod maziva ispitivanih na čeličnim zupčanicima bez prevlake. Također se vidi da su čestice trošenja iz mineralnog ulja veće od čestica iz formulacije estera za oba materijala boka zuba zupčanika.

Očekivano je da će čestice trošenja odvojene iz formulacije mineralnog ulja za čelične zupčanike biti veće budući da je koeficijent trenja za maziva na osnovi estera i čeličnih kontaktnih površina obično niži [6,7]. Niža temperatura uljne kupke (slika 3) također ukazuje na niži koeficijent trenja za estersku formulaciju.

Iako su navedene čestice pronađene na različitim kombinacijama zupčaničkih materijala različitih veličina i sastava, većina njih su plosnate pahuljice nepravilnih oblika i općenito bezlične površine bez karakterističnih strija koje bi ukazivale na značajno trošenje. Zapravo, ovo je promatrana morfologija za većinu čestica trošenja većih od 15  $\mu\text{m}$ . Taj podatak govori daje isti mehanizam trošenja proizveo sve čestice. Međutim, čestice trošenja proizvedene interakcijom dviju površina, kao što su zupci zupčanika, podložne su stalnim visokim kontaktnim pritiscima te je stoga kod njih naglašena tendencija da budu spljoštene i zaglađene pod silama koje na njih djeluju. Ovaj proces govori u prilog tipičnoj morfologiji čestica koja je uočena i ukazuje na to da nakon nastanka čestica dolazi do značajnih promjena na morfologiji čestica trošenja.

Druga karakteristična grupa su abrazivne čestice trošenja prikazane na slikama 4c i 5c. Abrazivne čestice trošenja stvaraju se penetracijom, brazdanjem ili zarezivanjem jedne površine o drugu. One dobivaju oblik minijaturnih spirala, petlja ili prstena. Njihova prisutnost je abnormalna. Ovakve vrste čestica su pronađene samo na predmetnim stakalcima iz ispitivanja zupčanika s volfram-DLC prevlakom. One nisu pronađene na stakalcima iz maziva dobivenih na temelju ispitivanja čeličnih zupčanika. Također se ističu vrlo velike plosnate čestice dobivene ispitivanjem formulacije mineralnog ulja i zupčanika s volfram-DLC prevlakom. Slika 6 prikazuje najveće čestice izdvojene iz ulja. One iznose od 70–125  $\mu\text{m}$  prema najvećoj veličini što ukazuje na teške uvjete trošenja.

Slika 6: Predmetno stakalce napravljeno iz mineralnog ulja od ispitivanja zupčanika s volfram-DLC prevlakom, nakon 146 kWh izvršenog rada, uvećano 500 puta, a) velike čestice; b) najveća čestica; c) najveća čestica, uvećana 100 puta



Vrlo velike čestice trošenja i prisutnost abrazivnih čestica ukazuje na to da se mehanizmi trošenja zupčanika bez prevlake i s volfram-DLC prevlakom međusobno razlikuju. Za zupčanike s volfram-DLC prevlakom trošenje vjerojatno počinje ispod



površine, dok je dominantni oblik trošenja kod zupčanika bez prevlake adhezivno trošenje koje počinje od površine.

## 5 Zaključci

- Pri ispitivanjima s čeličnim zupčanicima, formulacija na osnovi estera pokazuje veću otpornost na zaribavanje nego formulacije s mineralnim uljima.
- Radno svojstvo zaštite od zaribavanja mineralnog ulja i zupčanika s volfram-DLC prevlakom značajno je poboljšano u usporedbi s čeličnim zupčanicima. Međutim, neke čestice iznad 100  $\mu\text{m}$  na najvećem dijelu ukazuju na teške okolnosti pri trošenju. Kod formulacije na osnovi estera, vrijednosti trošenja za čelične zupčanike i zupčanike s volfram - DLC prevlakom su slične.
- Materijal površine bokova zuba više utječe na porast temperature nego upotrijebljeno mazivo.
- Mehanizam trošenja kod zupčanika s volfram-DLC prevlakom i bez nje je različit.

### Literatura

- [1] KRŽAN B., VIŽINTIN J., Guide to present and future technologies, ed. by VIŽINTIN J., KALIN M., DOHDA K., JAHANMIR S., ASME Press, New York, 2004.
- [2] WILLING A, Chemosphere, 43, 89.-98., 2001.
- [3] JIANG J.C., MENG W.J., EVANS A.G., COOPER C.V., Surface and coatings technology, 176, 50.-56., 2003.
- [4] MERCER C., EVANS A.G., YAO N., ALLAMEH S., COOPER C.V., Surface and coatings technology, 173, 122.-129., 2003.
- [5] ISO DIS 14635-1: FZG test procedure for relative scuffing load capacity of oils, Part 1: Test method A/8.3/90, 1996.
- [6] KALIN M., VIZINTIN J., Proceedings of the 11th Nordic Symposium on Tribology, 549.-564., 2004.
- [7] KRZAN B., VIZINTIN J., Goriva i maziva, 41, 4, 199.-225., 2002.

UDK	ključne riječi	key words
539.375.6	trošenje zupčanika, FZG test	FZG gear wear test
621.385.6	prevlačenje magnetronskim rapršivanjem u vakuumu	coating by magnetron sputter deposition
546.78	volfram (W)	tungsten (W)
546.78 : 546.26-162	prevlaka volframom i ugljikom dijamantne strukture	tungsten and diamond like carbon coating
621.892.2	mazivo ulje, mineralne osnove	mineral base oil
621.892.28	mazivo ulje, sintetske osnove	synthetic base oil

### Autori

dr.sc. Boris Kržan, [boris.krzan@ctd.uni-lj.si](mailto:boris.krzan@ctd.uni-lj.si); prof. dr.sc. Mitjan Kalin; prof. dr.sc. Jože Vižintin Sveučilište u Ljubljani, Centar za tribologiju i tehničku dijagnostiku, Slovenija

**Primljeno**  
03.7.2008.