

Rezime:

Poznato je da se intenzivno teži smanjenju potrošnje goriva kod motora SUS, pre svega iz ekoloških razloga. To se postiže primenom raznih konstrukcionih mera, među kojima su i postupci koji doprinose smanjenju trenja. Da bi se postigao određeni uspeh na tom planu, neophodno je da se poznaju tribološke karakteristike motora u celini, kao i pojedinih sklopova i sistema. Najveći uticaj na trenje u motoru, a time i najveći interes za izučavanje triboloških karakteristika, izazivaju klipna grupa, ležaji kolenastog vratila, sistem razvoda i sistem za podmazivanje. Tribološke karakteristike motora treba poznavati još u fazi konstruisanja motora, jer jedino na taj način može da se da puni doprinos smanjenju potrošnje goriva i izduvne emisije.

Gljučne reči: motor SUS, mehanički gubici, tribologija motora.

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF IC ENGINES

Summary:

Intensive research for decreasing fuel consumption of IC engines is due wainly to ecological reasons. The problem can be solved by applying numerous diferent design solutions, among them methods for friction decrease. In order to achieve any success in that field it is necessary to be familiar with tribological features of a complete engine and its individual parts and assemblies. The main influence on IC engine friction losses comes from the piston group, the cranckshaft bearings, the timing system and the lubrication system. Tribological characteristics have to be determined in the first stage of IC engine design, because this is the only way to give full contribution to the decreasing of fuel consumption and exhaust emission.

Key words: IC engine, mechanical losses, engine tribology.

Uvod

Razvoj motora SUS uslovljen je razvojem mnogih drugih disciplina, među kojima tribologija (nauka i tehnologija o procesima trenja, habanja i podmazivanja) zauzima vidno mesto, jer znatno doprinosi rešavanju aktuelnih problema sa gledišta efektivnosti i pouzdanosti motora.

S obzirom na to da radne karakteristike, pouzdanost i vek trajanja vitalnih delova motora u znatnoj meri zavise od triboloških procesa, predviđanje njihovih triboloških karakteristika u fazi projektovanja i konstruisanja od posebnog je interesa. Osnovni razlozi koji iniciraju značajna istraživanja u tribologiji motora SUS su [1]:

– najveće uštede energije mogu se ostvariti pri transportu sredstava;

– visok je značaj i uticaj tribologije na ekonomičnost rada motora;

– motor SUS sadrži veliki broj triboelemenata;

– postoji opšta tendencija smanjenja mase motora u odnosu na snagu, sa svim posledicama na razvoj triboloških procesa.

Imajući u vidu da se od ukupno proizvedene energije u svetu 30% utroši na savladavanje procesa trenja, jasno je zbog čega se ova problematika razmatra u oblasti motora. Istraživanja u tribologiji motora SUS povezana su sa smanjenjem potrošnje goriva preko smanjenja trenja, sa povećanjem pouzdanosti svih pokretnih komponenta i sa zaštitom okoline od zagađenja izduvnim gasovima.

Definisanje triboloških karakteristika motora SUS

Sa stanovišta delova i sistema motora, što je praktičniji prilaz za većinu inženjera konstruktora, naročito su interesantne sledeće komponente motora: klizni ležajevi kolenastog vratila, klipna grupa, sistem razvoda i sistem za podmazivanje.

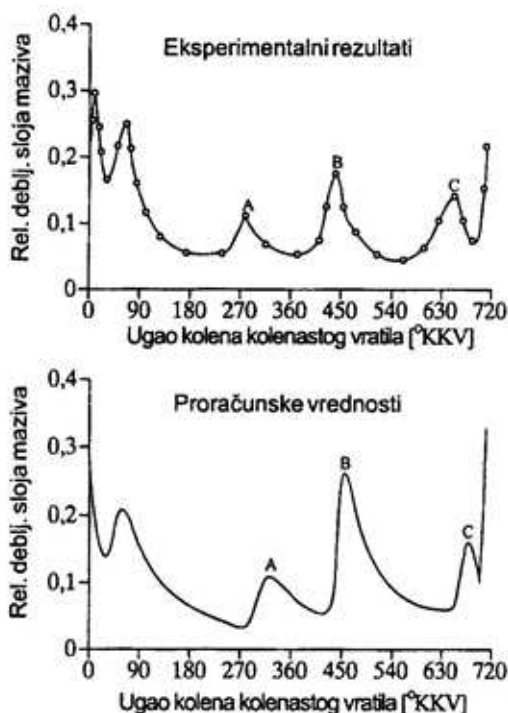
Triboelementi u ovim sistemima i sklopovima obavljaju svoju funkciju pri različitim režimima podmazivanja, što treba da bude osnovno polazište pri daljim tribološkim razmatranjima.

Klizni ležaji kolenastog vratila

Pošto klizni ležaji kolenastog vratila funkcionišu u oblasti hidrodinamičkog podmazivanja, njihov proračun sa tribološkog stanovišta obuhvata određivanje:

debljine uljnog filma, veličine trenja, temperature ulja u ležaju i protoka ulja kroz ležaj. Sloj maziva ima sledeće funkcije: da odvodi toplotu generisanu u ležaju, nosi opterećenje i održava spregnute površine potpuno razdvojene. Otuda i osnovni značaj određivanja debljine uljnog filma.

Međutim, dinamička opterećenja koja trpe ležaji motora SUS pri promenljivom broju obrtaja čine proračun relativno složenim zadatkom. Do hidrodinamičkog trenja može doći u ulaznoj oblasti ležaja, pri čemu dolazi do habanja samo ako nema podmazivanja, kada je moguće kratkotrajno suvo trenje. Danas postoje brojni postupci za procenu debljine uljnog filma, a njihovi rezultati pokazuju relativno dobro slaganje sa eksperimentalnim mere-



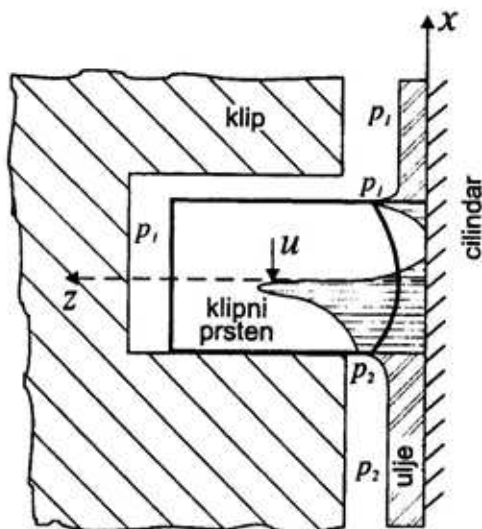
Sl. 1 – Usporedni rezultati relativne debljine uljnog filma kod kliznih ležaja kolenastog vratila

njima (slika 1). To dokazuje da se već danas u fazi konstruisanja može analizirati stanje ležaja sa gledišta podmazivanja i uticaja pojedinih faktora. Temperatura ulja u ležaju i protok ulja međusobno su zavisne veličine. Predviđanje protoka povezano je sa vrednošću pritiska pod kojim se ulje dovodi u ležaj i sa dozvoljenom radnom temperaturom ležaja.

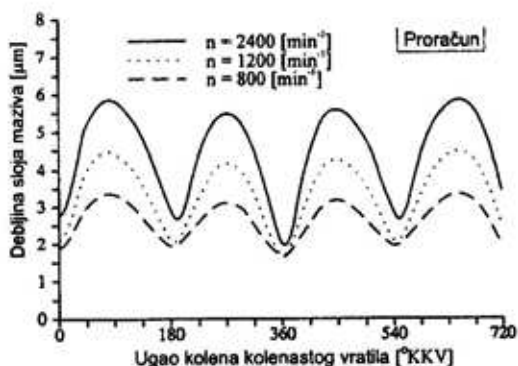
Klipna grupa

Razvoj klipnih prstenova, sa gledišta materijala i konstrukcije, menjao se zajedno sa opštim tendencijama smanjenja mase motora i oscilujućih masa. Zbog toga je uočljivo smanjenje dimenzija, ali i promena oblika radne površine klipnih prstenova. Pri tome se postavljaju zahtevi da se smanji trenje i habanje bez degradacije efikasnosti zaptivanja. Istovremeno, iskazuje se tendencija smanjenja zazora i potrošnje ulja, što rezultira i smanjenjem štetne emisije motora.

Od upotrebljenih materijala dominantna je upotreba sivog liva, ali je sve prisutnije i korišćenje čeličnih prstenova sa odgovarajućim prevlakama, i to posebno kod savremenih motora velikih snaga. Gubici usled trenja kod klipno-cilindarske grupe neminovno su povezani sa uslovima podmazivanja klipnog prstena i cilindra. Kako klipni prsten može da radi u oblasti potpunog i nepotpunog podmazivanja, matematički modeli za proračun vezani su za hidrodinamičko i granično podmazivanje. Teorijska analiza hidrodinamičkog podmazivanja klipnih prstenova znači primenu Rejnoldsove jednačine, sa analizom pritiska u sloju maziva (slika 2) i proračunom debljine sloja maziva (slika 3).



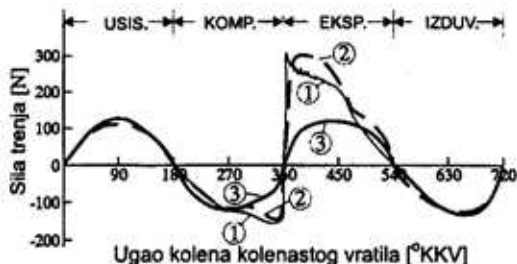
Sl. 2 – Geometrija klipnog prstena i pritisak u uljnom filmu



Sl. 3 – Promena debljine uljnog filma ispod klipnog prstena

Smanjenje trenja klipne grupe odlučujuće je za povećanje mehaničkog stepena korisnosti motora, pa su istraživanja u toj oblasti vrlo intenzivna. Posebno treba ukazati na rezultate matematičkog modeliranja trenja, koji pokazuju dobro slaganje sa eksperimentalnim istraživanjima (slika 4). To omogućava da se u fazi projektovanja motora oceni vrednost trenja i mehaničkih gubitaka.

1. Furuhamu: eksperimentalni rezultati (puno opt.)
2. Hoši: računski rezultati (puno opt.)
3. Hoši: računski rezultati (bez opt.)



Sl. 4 – Sila trenja klipnog prstena

Hidrodinamički podmazujući uljni film između klipa i cilindra narušava se usled naizmeničnog kretanja klipa [2], koje uključuje i zaustavljanje u mrtvim tačkama, što dovodi do stvaranja uslova graničnog podmazivanja, posebno za vreme razrade motora. Mada legura aluminijuma i silicijuma u klipnoj grupi ima dobre osobine, primena dodatnih prevlaka na površini pruža još značajnije prednosti za vreme razrade. Koriste se tanke prevlake od metala ili grafita, a odgovarajuće radne osobine dobijaju se upotrebom olova i kalaja. Ove prevlake nanose se jonskom razmenom sa površinom aluminijuma (bez električne struje) uz pomoć rastvora olova i kalaja. Pošto su oba metala plemenitija (u elektromehaničkoj seriji) od aluminijuma, oni se deponuju na površini. Aluminijum se rastvara dok se formira zatvoreni sloj olova ili kalaja na površini. Na račun njihovih prednosti pri radu u lošim uslovima, široku primenu u oto motorima imaju prevlake od ovih metala, čija debljina iznosi svega 1 do 2 nm [2].

Firma Mahle koristi prevlaku od *grafala*, koja se sastoji od finog koloidnog grafita koji se povezuje fenolnom smolom. Sloj je deo približno 10 do 20

nm, a nanosi se prskanjem i zaštitnim otiskivanjem, posle čega sledi pečenje. Poboljšanje adhezionih karakteristika može da se postigne pomoću tankog metalno-fosfatnog sloja (vezujući sloj) koji se primenjuje pre nanošenja prevlake. Zbog svoje kompatibilnosti sa uljem i dobrih osobina rada u uslovima lošeg podmazivanja, ova prevlaka se koristi preko cele površine, posebno kod dužih klipova. Osim kod većih motora, ova prevlaka se u velikoj meri primenjuje i kod automobilskih oto i dizel motora [2].

Kod najnovijih konstrukcija velikih brodskih motora primenjuje se poboljšano podmazivanje klipnih prstenova i cilindarske košuljice, doziranjem dovoda ulja kroz otvore u cilindarskoj košuljici, na rastojanju oko 20% hoda klipa od spoljne mrtve tačke [3]. Takođe, primenjuje se i elektronski sistem kontrole podmazivanja cilindra, koji ima za cilj kontrolu količine ulja koja se doprema u zonu klipnih prstenova, u zavisnosti od broja obrtaja i opterećenja motora, u svim režimima, uključujući i prelazne. Takav sistem dopunjen je uređajem za automatsko okretanje motora pri njegovom puštanju u rad, što znatno povećava ne samo pouzdanost nego i ekonomičnost motora. Potrošnja ulja je veoma značajna stavka kod brodskih motora. Ona se sada kreće od 1,02 g/kWh do 1,9 g/kWh, a u bliskoj budućnosti predviđa se 0,68 g/kWh do 0,95 g/kWh [3].

Sistem razvoda

Za sve sisteme razvoda karakteristično je da na površinama u dodiru i relativnom kretanju vladaju visoka specifična opterećenja, što znači da za njih va-

že Hercovi uslovi dodira. Elastično-hidrodinamička teorija podmazivanja osnov je za rešavanje takvih triboloških problema. Međutim, zavisno od geometrije i brzine kretanja delova, kao i od osobina ulja, obim ostvarene vrste podmazivanja realno se kreće od graničnog do elasto-hidrodinamičkog podmazivanja. U kontaktnoj oblasti između brega i pogona ventila, usled velikog površinskog pritiska i nepovoljne geometrije, mora se računati sa velikim udelom mešovitog trenja.

Sistem za podmazivanje

Podmazivanje vitalnih delova i mehanizama motora uključuje i razmatranje sistema pomoću kojeg se proces podmazivanja ostvaruje. U prošlosti su sistemi za podmazivanje, po pravilu, bili predimenzionirani kako bi se osigurala potrebna količina ulja i u ekstremnim slučajevima (npr. pri velikom zazoru koji nastaje usled habanja ležaja ili da se omogući adekvatno podmazivanje ako se iz osnovnog modela motora proizvode varijante većih snaga). Međutim, danas kada su svi naponi usmereni na povećanje ekonomičnosti motora, takav pristup nije adekvatan. Rešenja se traže kroz optimizaciju svih elemenata sistema za podmazivanje, simulacijom sistema tokom projektovanja motora. Optimizacija sistema za podmazivanje vrši se sa tendencijom integracije sistema za podmazivanje i hlađenje.

Sistem podmazivanja može se nazvati „krvotokom“ motora, jer gubici ulja, ili nedovoljno snabdevanje uljem kritičnih komponenata, može dovesti do havarije motora. Za kvalitet podmazivanja naročito su bitni:

– kontakti pritisak (ili napon opterećenja u kontaktu). Kod jednokrake klackalice, koja naleže na breg, kontakti pritisak zavisi od geometrije sistema razvoda i sile ventilskih opruga. U linijskom kontaktu prstena, kontaktno opterećenje definisano je pomoću kombinacije pritisaka gasa, konstrukcijom (oblikom) prstena i deformacijom cilindarske košuljice, i teško ih je odrediti sa većom tačnošću;

– kontaktna temperatura. U glavnim ležajevima to je temperatura motorskog kućišta (gornjeg) i uticaj toplote zbog smicanja (klizanja). U jednokrakoj klackalici i u linijskom kontaktu prstena okolna temperatura može da se meri, ali postoji jaka dodatna komponenta usled stvaranja toplote u procesu klizanja, dok najveći uticaj ima proces sagorevanja. Najveći gradijent pruža se prema donjem delu klipa. Postoje merenja ovih temperatura pomoću infracrvenih sondi na strani cilindra, a od ovakvog metoda puno se očekuje u budućnosti.

Formulacija maziva veoma je bitna za rešavanje triboloških problema. Međutim, ona je vrlo složena, jer postoji niz oprečnih zahteva koji se moraju ispuniti. Mazivo mora da ima oksidacionu stabilnost, karakteristike protiv penjanja, detrdžentnost, otpornost na kidanje uljnog filma, ograničenja u viskozitetu, dobre karakteristike u širokom temperaturnom opsegu, protivhabajuće osobine i osobine protiv „skafinga“ [4]. Iz istog kućišta motora vrši se, radi podmazivanja, snabdevanje uljem mehanizama koji imaju u tom pogledu različite zahteve (klipnih prstenova, cilindarske košuljice, klackalica ventila, ležaja kolenastog vratila, bregastog vratila i osovinice klipa). U takvim

uslovima ne samo da su različiti materijali u kontaktu, nego ulje funkcioniše i u širokom dijapazonu temperatura i opterećenja. U glavnim ležajima ulje radi na temperaturi kućišta koja može da varira od vrednosti ispod nule (temperatura okoline), do radne temperature od 80°C do 120°C. Isto ulje je na pojedinim mestima izloženo temperaturi od 300°C do 360°C (gornji prsten u spoljnoj mrtvoj tački – u fazi sagorevanja), a tu se meša i sa produktima sagorevanja. Motori SUS u seriji i razvoju do devedesetih godina prošlog veka doveli su tehnologiju maziva do gornje granice. Uvođenje bregastog vratila na glavi motora, povezano sa kućištima od aluminijuma i poboljšanjem konstrukcije komore sagorevanja, doveli su do velikog smanjenja mase i boljeg stepena korisnosti procesa sagorevanja. Ova poboljšanja zahtevala su i razvoj maziva koje će moći da prati ekstremne radne uslove.

Konstrukcija sklopova motora mnogo utiče na tribološke karakteristike, jer je uspešno trenje (na primer klackalice ventila ili klizni ležaji bregastog vratila) povezano sa kombinacijom dobrih materijala, dobrog procesa finalne obrade površina i kvalitetnog ulja. Smanjenje mase dovelo je do izmena u funkciji klipa, smanjenja dimenzija pojedinih regiona na klipu, prečnika osovinice klipa, kompresione visine kao i promene oblika plašta (slika 5). Međutim, ove promene izazvale su kreking na čelu klipa, žlebu za prsten i zidu komore za sagorevanje. Na tim mestima su velika toplotna i mehanička naprezanja, usled čega dolazi do slabljenja materijala. Visok položaj prvog kompresionog prstena, ili mala debljina zida komore za sagorevanje, povećavaju promene

usled krekinga ulja. Ove karakteristike klipa imaju i mnoge koristi, uključujući povećan termodinamički stepen sagorevanja (smanjenu potrošnju goriva), kao i smanjenu emisiju (izdub i buku).



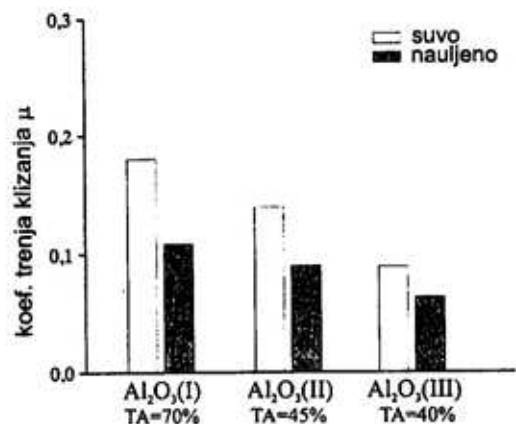
Sl. 5 – Klip sa smanjenom kontaktnom površinom plašta koja smanjuje trenje i masu klipa

Primenjeni materijali takode imaju veliki uticaj na tribološke karakteristike. Danas se, uglavnom, koriste cilindarske košuljice od sivog liva. Koristi zbog smanjenja mase i izbegavanja dve proizvodnje koje treba radno objediniti (sivi liv+Al) jasne su. Silicijumska legura aluminijuma ima prihvatljivu otpornost na dugotrajan rad prstena (kontakt klipa i prstena) i duži vek upotrebe od sivog liva. Ipak, livena aluminijumska legura još uvek nema mikrostrukturu koja može da pruži dobre karakteristike otpornosti na habanje [4].

Treba istaći da se u konstrukciji motora SUS sve češće primenjuju delovi od keramike ili delovi sa keramičkim pre-

vlakama (oblogama), zbog visoke toplotne otpornosti, kao i zbog malog trenja i habanja. Habanje utiče na vek upotrebe i intervale remonta, pri čemu treba posebno obratiti pažnju na elemente cilindra (klizne površine), sedišta ventila i vodice ventila, poluge podizača (klackalice), podizače ventila, bregasto vratilo, klizne prstenove u pumpi za vodu i ležaje. Velika krtost i tvrdoća keramičkih površina ne moraju istovremeno da znače i optimum u odnosima trenja i habanja.

U [5] su dati koeficijenti trenja klizanja koji su izračunati pri suvom trenju i pri podmazivanju uljnim kapima. Pri oba radna uslova, kako je predstavljeno na slici 6, menjani su materijali ispitnog uzorka u obliku valjka: Al_2O_3 , $Al_2O_3-ZrO_2$, Si_3N_4 i SiC . Najmanje vrednosti koeficijenta trenja pokazao je uzorak od SiC ($\mu=0,05$ za suvo trenje i $\mu=0,035$ za trenje u prisustvu ulja).

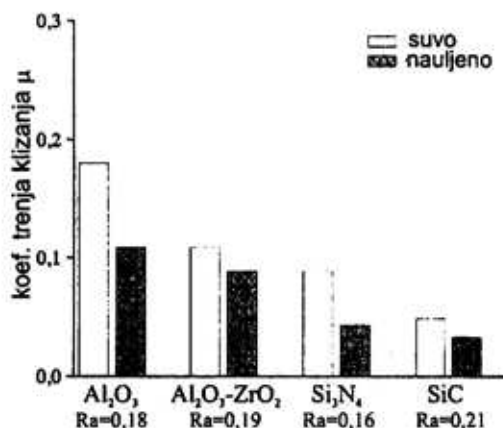


Sl. 6 – Trenje klizanja u zavisnosti od materijala keramika – keramika

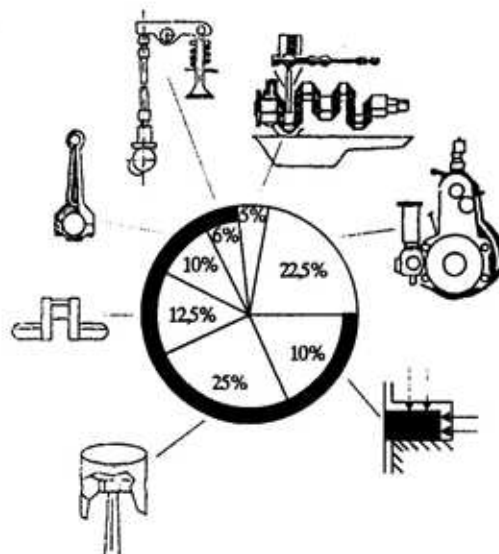
Parovi sa najmanjom veličinom noseće površine (ali sa najvećom hrapavošću), imaju najmanji koeficijent trenja klizanja i to $\mu=0,09$ pri suvom i oko $\mu=0,07$ pri trenju u prisustvu ulja (slika

7). Ove relacije često opovrgavaju pogrešnu pretpostavku, da „veoma glatka“ površina znači i malo trenje.

Trokomponentna keramika (PSZ , Al_2O_3-TiC , Si_3N_4) koristi se kao prevlaka na klackalicama u sistemu razvoda. Serijsko izvođenje ovih elemenata motora



Sl. 7 – Trenje klizanja u zavisnosti od uslova na kliznim površinama (hrapavost Ra je obrnuto proporcionalna veličini noseće površine ležaja TA)



Sl. 8 – Raspodela gubitaka trenja u motoru

biće uspešno samo ako napreduje tehnika spajanja keramičkih oblika i osnovnog tela u serijskim uslovima primene.

Na slici 8 prikazana je distribucija mehaničkih gubitaka po komponentama. Postoje mogućnosti smanjenja trenja upotrebom kvalitetnijeg ulja, boljim snabdevanjem motora uljem i korišćenjem kvalitetnijih materijala. Ti sklopovi su na dijagramu posebno označeni. Sa stanovišta habanja dve su oblasti najkritičnije – kontakt prstena i cilindarske košuljice i kontakt klackalice sa bregastim vratilom.

Poboljšanja materijala od kojih su izvedeni elementi motora i odgovarajuća maziva, imaju važnu ulogu u konstrukciji motora devedesetih godina prošlog veka. Način tribološkog konstruisanja u sistemima motora je esencijalan za očuvanje njihove trajnosti i korisnosti u toku rada. Zbog toga ova poboljšanja treba da budu definisana još u fazi konstruisanja, kao što su: optimalna metalurgija i finiširanje tarnih parova, prikladan izbor maziva i aditiva za očekivane radne uslove i sistem podmazivanja koji će obezbediti pristup ulja na sva mesta gde je neophodno podmazivanje osetljivih delova.

Zaključak

Zbog značaja i uticaja tribologije na ekonomičnost rada motora od posebnog je interesa predviđanje triboloških karakteristika motora još u fazi projektovanja i konstruisanja. Rešenja koja se danas nude uglavnom se odnose na poboljšanje triboloških karakteristika materijala, pre svega primenom raznih modifikacija površina i prevlaka [6]. Osim toga, neophodan je i razvoj analitičkih modela za što tačnije predviđanje triboloških karakteristika pokretnih delova motora u toku samog projektovanja. Pored toga, neophodan je i dalji rad na razvoju motornih ulja visokog učinka, kao i na optimizaciji sistema za podmazivanje.

Literatura:

- [1] Rac, A.: Tribologija motora SUS – stanje i tendencije, Tribologija u industriji, dec. 1994, str. 119–125.
- [2] Röhrle, D. M.: Pistons for Internal Combustion Engines – Fundamentals of Piston Technology, MAHLE GmbH, 1993, str. 28–29; 66–67.
- [3] Ведерников, Д. Н.; Шляхтов, В. А.: Решение трибологических проблем двигателей внутреннего сгорания: современная практика изготовителей и перспективы (по материалам зарубежной печати), Трение и износ, том 15, №1, январь – февраль, 1994, стр. 138–147.
- [4] Alliston, P.: (Plint and Partners Ltd, Workingham, Berks), Tribology in engine development – The role of test methods and procedures, Fuel and lubricants, str. 221–225.
- [5] Droscha, H.: Reiving und Verschleiß bei Keramik im Motorenbau, MTZ 7–8/1987, str. 278–280.
- [6] Gradin, B. Z.: Analiza mehaničkih gubitaka dizel motora sa direktnim ubrizgavanjem, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.