

Rezime:

Savremene konstrukcije motora SUS treba da zadovolje zahtev za malu potrošnju goriva i ulja za podmazivanje, pre svega zbog ekoloških a zatim i energetskih i ekonomskih razloga. Pošto se pretpostavlja da će konvencionalni motori SUS još dugo dominirati kao pogonski agregati, raznim konstrukcionim merama pristupa se smanjenju potrošnje goriva, a time i smanjenju izduvne emisije. Pre svega, radi se o optimizaciji radnog ciklusa, primeni varijabilnog stepena sabijanja, primeni varijabilnog razvoda radne materije, boljim sprežanjem sa gasnim mašinama, itd. Značajan potencijal za povećanje ekonomičnosti rada motora jeste u smanjenju mehaničkih gubitaka. Najveći udeo u mehaničkim gubicima predstavlja trenje pokretnih delova motora, pre svega delova klipno-cilindarskog sklopa. Zbog toga se posebna pažnja posvećuje izučavanju mehanizma trenja, koji je inače veoma složen.

Ključne reči: motor SUS, mehanički gubici, raspodela gubitaka.

MECHANICAL LOSSES AND THE PRINCIPLE OF FRICTION IN IC ENGINES

Summary:

One of demands for modern designed IC engines is low fuel and lubricant consumption because of reasons concerning ecology as well as energy and economy. The supmision is that conventional IC engines will be the first choice as a power source for numerous applications in the future. Therefore, many changes and improvements in design need to be done for further decrease of fuel consumption followed by the decrease of exhaust emission. First of all, there is the optimisation of the working cycle, the application of variable compression, the aplication of variable valve control, better couplina with gas machines, etc. Significant potential for efficiency improvement of IC engines is in reducing mechanical losses. Mechanical losses in IC engines are caused mostly by friction between the mobile parts of the engine (piston-cylinder assembly). Therefore, continual attention to the research process of studying friction problemys would be necessary.

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

Uvod

Za poslednjih 25 godina snaga automobilskih motora povećana je 100%, dok je emisija gasova smanjena 10 puta,

a potrošnja goriva dva puta. Savremeni motori su manji, rade sa siromašnijom smešom, imaju promenljivi stepen kompresije, radne temperature su više, a količina ulja u koritu motora sve manja. Ve-

liki broj motora nove generacije su sa natpunjenjem (naročito dizelmotori), sa četiri ili pet ventila po cilindru koji obezbeđuju kvalitetnije radne procese, ali su im i radne temperature više.

Proizvođači motora i motornih vozila će i nadalje nastojati da postignu što veće iskorišćenje energije i smanjenje emisije izduvnih gasova, uz zadovoljenje potreba krajnjih korisnika. Evropske proizvođače, između ostalog, na to obavezuju i propisi EURO.

Veća ekonomičnost i smanjena emisija savremenih motornih vozila ne može da se ostvari samo odvojenim intervencijama konstruktora na vozilu ili motoru. U ovakvom pristupu postoji potreba za korišćenjem vrhunskih znanja iz širokog kruga naučnih i tehničkih disciplina.

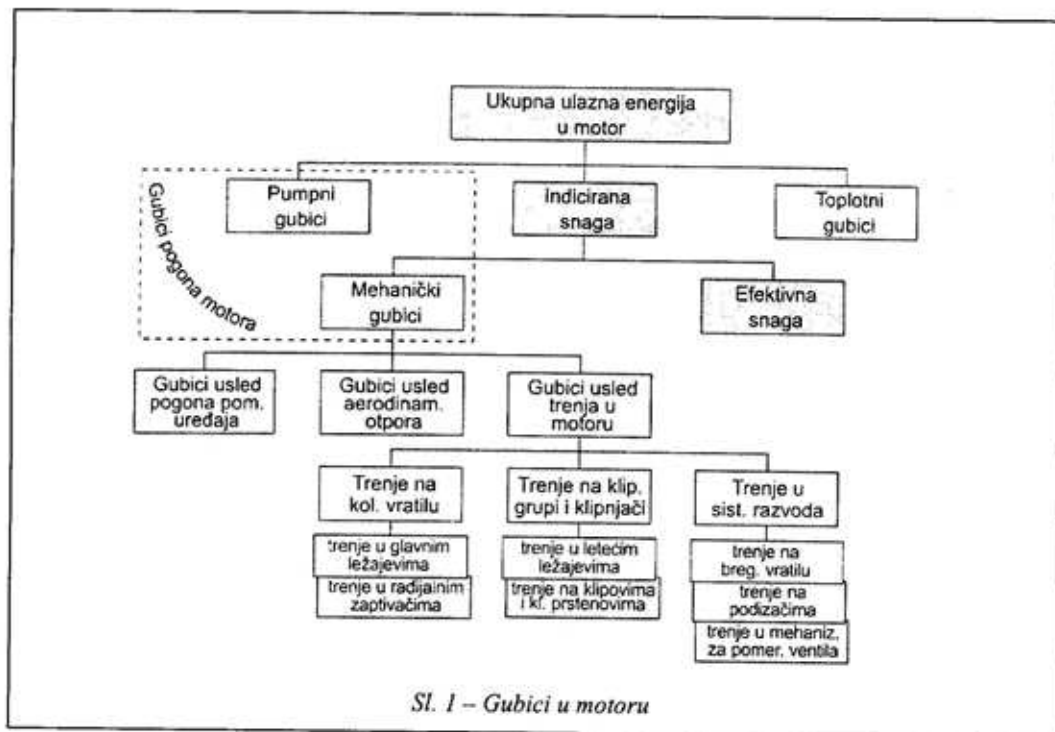
Poboljšanje efektivnog stepena korisnosti kod savremenih motora postiže se,

pored ostalog, optimizacijom radnog ciklusa, primenom varijabilnog stepena sabijanja, varijabilnog razvoda, boljim sprežanjem sa gasnim mašinama, ali i smanjenjem mehaničkih gubitaka.

Vrste gubitaka u motoru

Mehanički gubici u motoru, koji se definišu kao razlika između indicirane snage (dobija se delovanjem radne materije na klip) i efektivne snage (izmerena kao izlaz na kolenastom vratilu) važan su faktor za određivanje performansi motora i stepena korisnosti (slika 1).

Gubici usled trenja u motoru definišu se kao gubici usled relativnog kretanja između čvrstih površina u motoru, tj. kretanja između klipa i zida cilindra ili između rukavaca kolenastog vratila i ležajeva. Relativno kretanje ne znači da se



Sl. 1 – Gubici u motoru

obavezno radi o tome da su dva čvrsta tela u kontaktu jedno sa drugim. Činjenica je da, u opštem slučaju, postoji uljni film između površina.

Gubici usled pogona pomoćnih uređaja obuhvataju i gubitke trenja i pumpne gubitke na samim pomoćnim uređajima. Pomoćni uređaji su:

- pumpa za ulje;
- pumpa za tečnost u sistemu hlađenja;
- generator;
- sistem za napajanje gorivom (pumpa visokog i niskog pritiska);
- razvodnik paljenja kod oto motora;
- mehanički napojni kompresor (dvostrukni i natpunjeni motori).

Gubici usled aerodinamičkih otpora kretanja delova motora nastaju usled aerodinamičkih otpora pri kretanju klipa, klipnjače, kolenastog vratila i ostalih delova u kućištu motora. Ovi gubici su u odnosu na ostale gubitke relativno mali i iznose od 2% do 3% ukupnih mehaničkih gubitaka, i najčešće se zanemaruju [1].

Pumpni gubici definišu se kao zbirni gubici kretanja fluida kroz cilindar i gubici koji nastaju pri usisavanju i izduvavanju. Gubici pri usisavanju i izduvavanju jesu rezultat proticanja fluida kroz usisni sistem, usisne ventile, izduvne ventile i izduvni sistem. Dodatni pumpni gubitak usled turbulentnog rasipanja ulja iz hidrodinamičkih ležajeva kolenastog vratila uključen je u gubitke do kojih dolazi pri trenju na kolenastom vratilu.

Pumpni gubici (gubici protoka za vreme usisavanja i izduvavanja u usisnim i izduvnim kolektorima motora i ventilima) ne pripadaju mehaničkim gubicima,

ali ih je teško razdvojiti od njih u toku eksperimenta, tako da se često razmatraju kao deo mehaničkih gubitaka, što nije korektno. Oni sa mehaničkim gubicima čine „gubitke pogona motora“ [2]. Ovaj termin je odabran, jer se mehanički gubici eksperimentalno određuju najčešće metodom spoljnog pogona motora (metodom vučenja).¹

Globalno uzevši, najveći gubici nastaju pri trenju, ali znatan udeo u gubicima čini utrošak snage na pogon pomoćnih uređaja motora. U svakom slučaju, različiti faktori utiču na veličinu mehaničkih gubitaka u motoru, a svi se mogu svrstati u tri grupe [3], kao što je prikazano na slici 2.

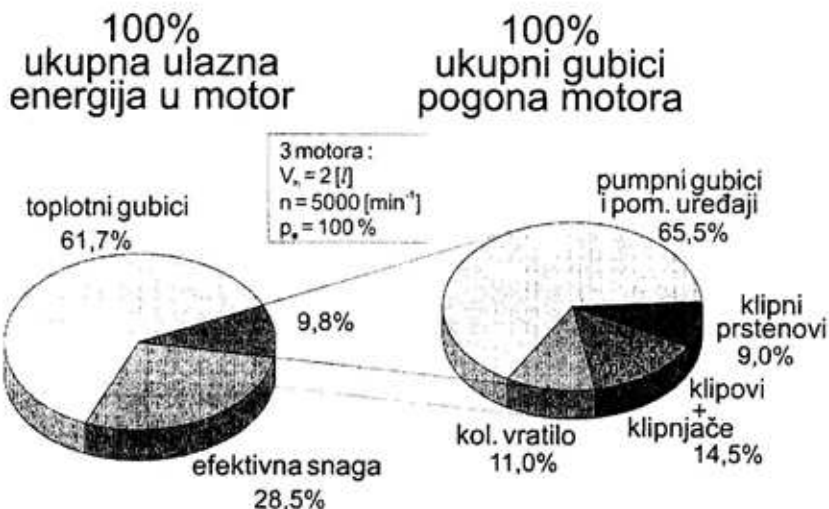
Raspodela mehaničkih gubitaka po komponentama motora

Na slici 3 prikazane su prosečne vrednosti raspodele energije za tri različita četvorocilindrična oto motora radne zapremine 2 l na 5000 min⁻¹ i pri punom opterećenju. Kružni dijagram na levoj strani pokazuje da se na osnovu 100% ulazne energije dobija 28,5% efektivne snage na kočnici, 9,8% energije se ubraja u gubitke pogona, a ostatak su toplotni gubici [4]. Kružni dijagram na desnoj strani pokazuje da od 100% gubitaka na pogon, 11% otpada na kolenasto vratilo, 14,5% se pripisuje klipovima i klipnjačama, a 9% se odnosi na klipne prstenove. U trenju klipova sa klipnjačama leteći ležajevi učestvuju sa oko 50% i isto toliko

¹ Motor SUS pokreće se spoljnim pogonom (najčešće elektromotorom), pod uslovima što približnijim uslovima pri sagorevanju, a potrebna snaga za pokretanje motora smatra se snagom gubitaka pod uslovima sagorevanja. Radi dobijanja učešća pojedinih komponenta koristi se progresivno skidanje delova motora (strip-postupak).



Sl. 2 – Faktori koji utiču na veličinu mehaničkih gubitaka u motoru



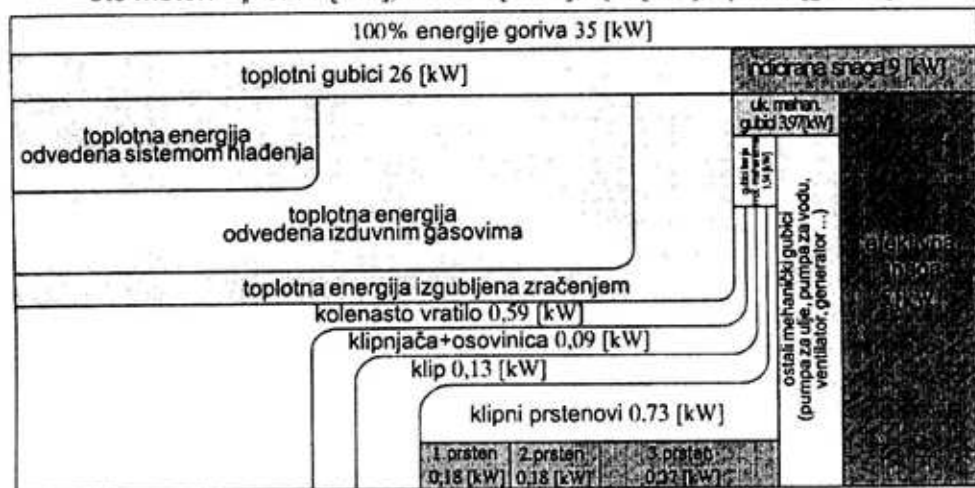
Sl. 3 – Raspodela energije oto motora

klipovi. Ostatak predstavljaju gubici usled izmene gasova i pogona pomoćnih uređaja, kao što su pumpe za ulje, vodu, itd. Može se zaključiti da klip i klipni prstenovi učestvuju u ukupnim gubicima pogona sa 16% ili 1,6% od ulazne energije [4].

Zbog zakonske regulative u vezi s emisijom gasova, razvoj motora nije fo-

kusiran na rad pri punom opterećenju, nego pri parcijalnim režimima. Na slici 4 prikazana je raspodela energije u jednom od ovih motora, pri delimičnom opterećenju na 2000 min^{-1} i efektivnoj snazi od 5 kW, što korespondira upotrebi sa ograničenjima gradske vožnje [4]. Potrebna ulazna energija je približno 35 kW, od kojih se 26 kW i oko 4 kW gube na neis-

oto motor: $V_s=1900$ [cm³], $n=2000$ [min⁻¹], $P_e=5$ [kW], $b_e=585$ [g/kWh]



Sl. 4 – Raspodela energije oto motora pri delimičnom opterećenju

korišćeno zagrevanje i mehaničke gubitke, respektivno. Na trenje motornog mehanizma tj. kolenasto vratilo, klipnjaču, klip i klipne prstenove troši se 1,54 kW. U donjem delu dijagrama ovih 1,54 kW prikazani su pojedinačno. Kolenasto vratilo odnosi 0,59 kW, a deo gubitaka koji se odnosi na ležajeve klipnjače približno iznosi 0,09 kW. Sledi da se ukupni gubici od 0,86 kW odnose na klipove i klipne prstenove. Istraživanja sprovedena radi smanjenja gubitaka trenja klipova i klipnih prstenova zasnovana su na potencijalu od 0,86 kW ili približno 2,5% od ulazne energije, na koju može da se utiče optimizacijom sistema klipnih prstenova i klipa. Raspodela gubitaka trenja u motornom mehanizmu pokazuje da klipni prsten u trećem žlebu (uljni prsten), sa učešćem od 0,37 kW, verovatno ima najveći potencijal.

Na slici 5 prikazane su vrednosti snage trenja četvorocilindričnog motora pri

radnim uslovima i pri brojevima obrtaja od 1000 min⁻¹ do 5000 min⁻¹. Upotrebljen je metod vučenja ogoljenog motora.²

Dijagram na levoj strani pokazuje apsolutne vrednosti snage u kW za kolenasto vratilo, klip i klipnjaču, uljni prsten, drugi prsten i prvi prsten (od dna do vrha). Dijagram na desnoj strani prikazuje iste izmerene nivoe, procentualno, u funkciji broja obrtaja.

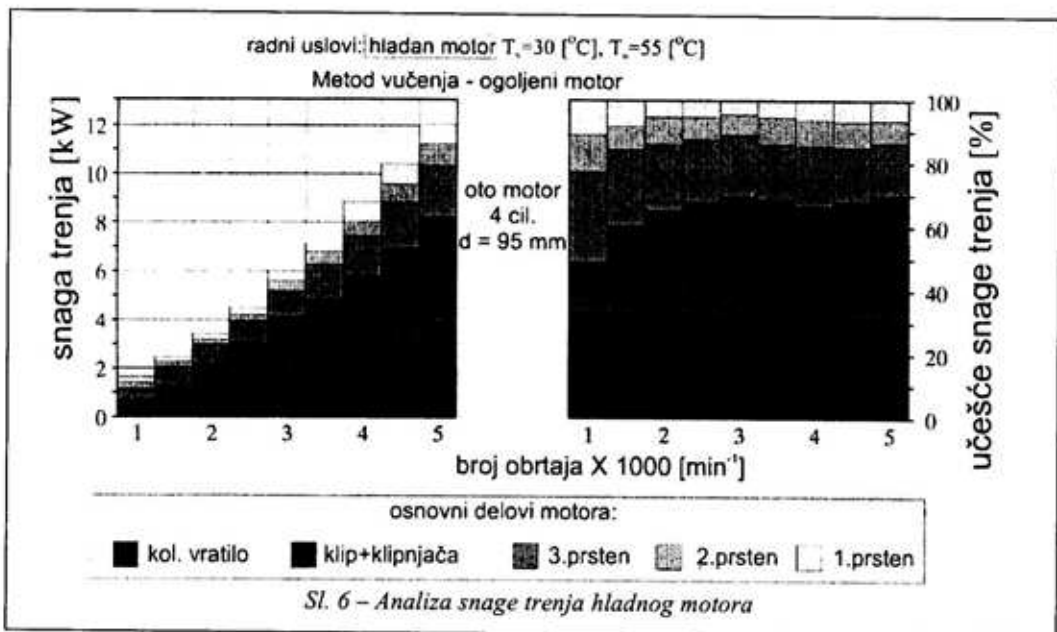
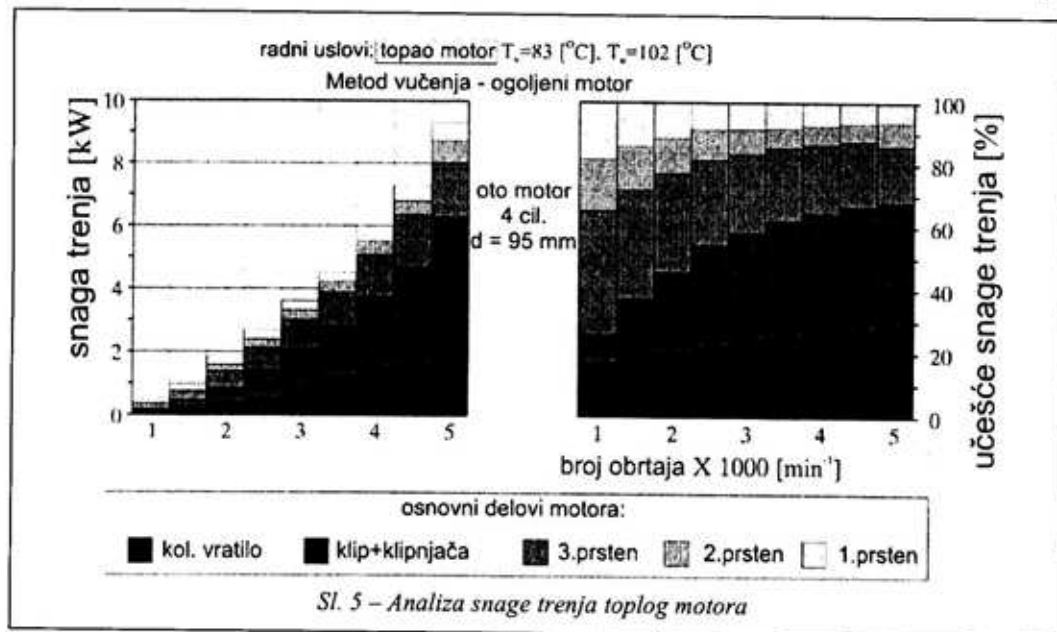
Posmatrajući sliku 5 može se uočiti dominantna snaga trenja u donjem delu vrednosti brojeva obrtaja, što je prouzrokovano klipnim prstenovima, s obzirom na to da su glavni gubici u oblasti viših brojeva obrtaja prouzrokovani klipovima, letećim ležajevima i glavnim ležajevima.

Na slici 6 prikazana su ista ispitivanja pri temperaturi vode 30°C i tempera-

² Proizvođači klipova uglavnom se odlučuju za pogon ogoljenog motora, tj. samo blok motora sa kolenastim vratilom, klipnjačom i klipovima, uključujući prstenove. Radna deformacija cilindra postiže se pritezanjem specijalnog alata umesto glave. Prednost ovog metoda je da se, ako je primenjena odgovarajuća mera tehnika, može očekivati tačnost merenja od 20 W do 25 W, što nije moguće sa kompletnim motorom.

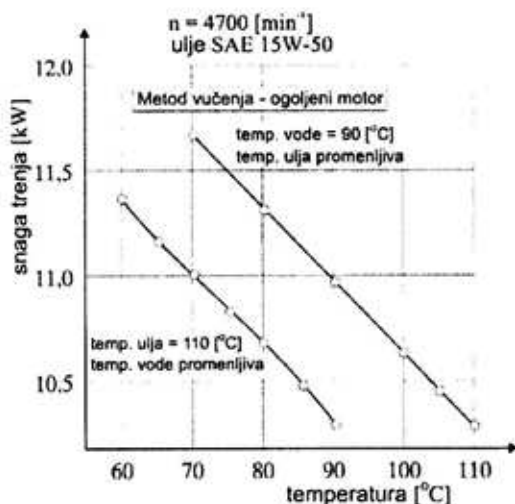
turi ulja 55°C. Apsolutne vrednosti su znatno veće, ali je uočljivo da, posebno u oblasti niskih brojeva obrtaja procentualni udeo gubitaka klipnih prstenova opada dok udeo kolenastog vratila raste.

Na prethodnim slikama prikazana je raspodela udela snage trenja pri različitim radnim temperaturama, a na slici 7 uticaj temperature ulja i vode kao jednog radnog uslova, pri 4700 min⁻¹. Kada je

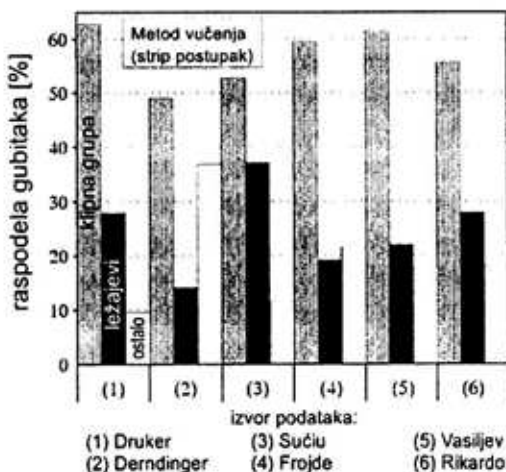


sniman ovaj dijagram, svi ostali parametri održavani su konstantnim. Bazirajući se na ovoj vrednosti broja obrtaja, promena temperature vode za 10°C dovodi do promene snage trenja za oko 360 W. Promena temperature ulja dovodi do istih zavisnosti, ali je koincidencija da su ovi uticaji približno isti (isti nagib krivulja), dok su uzroci različiti. Time se dokazuje da, ako se promeni temperatura ulja, gubici trenja jedino utiču na glavne i leteće ležajeve, dok promene u temperaturi vode nemaju efekta na glavne ležajeve. Celokupna promena snage trenja kroz temperaturu zida cilindra posledica je trenja klipova i klipnih prstenova.

Na slici 8 prikazani su rezultati dobijeni metodom vučenja po „strip“ postupku [5], po kojem se vidi razlika u trenju između pojedinih sklopova. Usled promenljivosti inercijalnih sila, pritiska u cilindru i temperature, ovaj metod dozvoljava samo grubu raspodelu gubitaka trenja u motoru. Ipak, jasno može da se



Sl. 7 – Uticaj temperature vode i ulja na snagu trenja



Sl. 8 – Raspodela mehaničkih gubitaka

uči dominantan uticaj klipne grupe na te gubitke sa učešćem 50 do 60%. Ležajevi (osnovni i leteći) u mehaničkim gubicima učestvuju sa 15 do 30%, dok pogon ventila, pumpe za ulje i pumpe visokog pritiska učestvuju u proseku sa 5 do 10%. Raspodelu srednjeg pritiska trenja u funkciji broja obrtaja za pojedine komponente mogu da izmene različita konstrukciona rešenja i različiti tokovi srednjeg pritiska trenja pojedinih komponenta. Detaljnim sagledavanjem ovih međuzavisnosti moguće je dobiti više činjenica o postupcima merenja i mogućnostima proračuna pojedinih komponenta, kao i zavisnosti gubitaka od konstrukcionih i radnih parametara.

Izbor motornog i transmisionog ulja može znatno da utiče na potrošnju goriva, što se dokazuje i kamionskim testom [6], koji pokazuje poboljšanje ekonomičnosti potrošnje oto motora (0,5 do 2,7%) izborom motornih ulja i kombinacijama motorno ulje – transmisiono ulje.

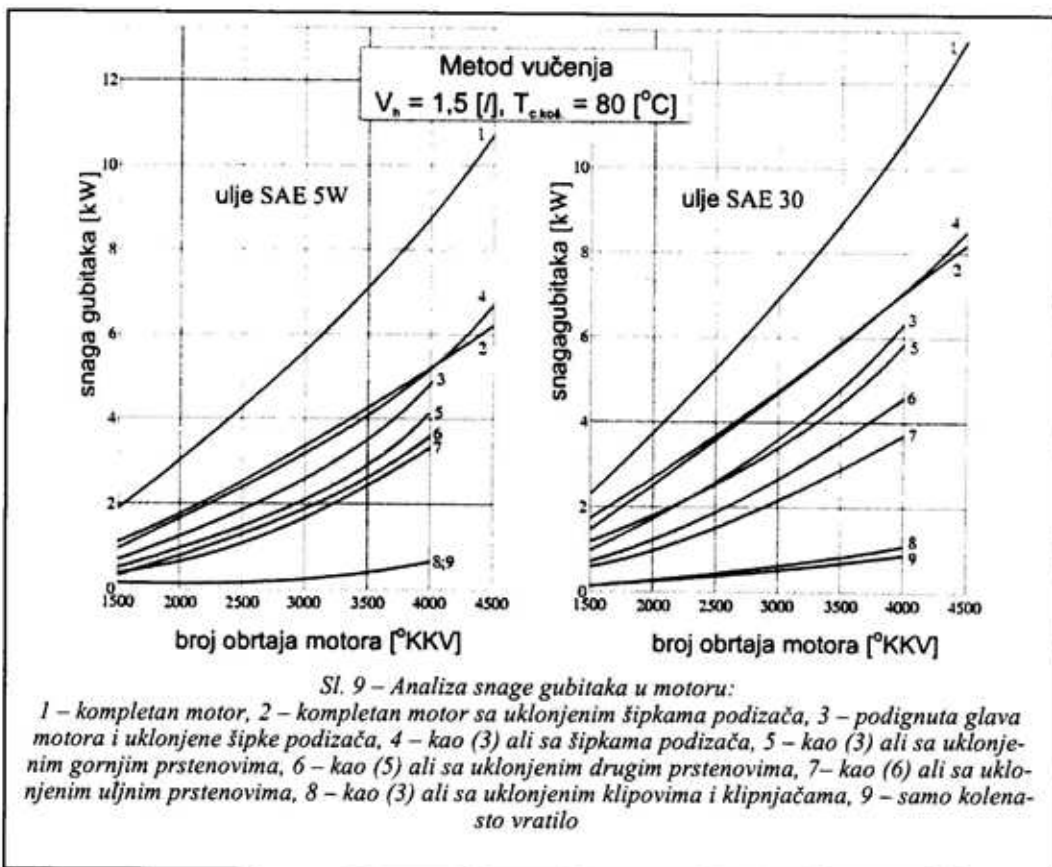
U uslovima hladnog starta motora mnogo su veći efekti uticaja maziva na

potrošnju goriva nego što je to uticaj veštine vozača. Relativan značaj promenljivih veličina koje utiču na potrošnju goriva za vreme hladnog starta, određuju niska temperatura okoline i kratkotrajnost procesa, kao uslovi u kojima izabrana maziva mogu da obezbede značajno smanjenje potrošnje goriva. Poboljšanje karakteristika ulja može da obezbedi znatnu uštedu goriva u radnim uslovima toplog motora. To ukazuje na mogućnost ekonomičnije potrošnje goriva izborom maziva, i sugeriše operativni nivo na kojem mogu da se očekuju najveća poboljšanja. Ostala ispitivanja identifikovala su lake uslove eksploatacije, kao uslova pri kojem viskozitet motornog ulja ima najzna-

čajnije efekte u smanjenju potrošnje goriva. Snaga koja se razvija kod nekog motora umanjuje se za iznos snage koja se koristi za savlađivanje trenja u motoru. Mnogi testovi u kojima se motor pogoni elektromotorom ne mogu da reprodukuju toplotni i mehanički uticaj koji postoji u testovima sa sagorevanjem, tako da oni predstavljaju pogodan način za određivanje približne vrednosti ove snage.

Podaci o snazi trenja dobijeni metodom vučenja u raznim ispitivanjima, prikazani na slici 9, pokazuju gubitke snage motora.

Pri broju obrtaja vučenjem od 4000 min^{-1} gubici klipnih prstenova i plašta klipa su 47% do 54% od snage trenja do-



bijene metodom vučenja, ukoliko se koriste motorna ulja SAE 5 i SAE 30, respektivno. Snaga gubitaka na klipnim prstenovima i plaštu klipa pokazuje potencijal za poboljšanje potrošnje goriva izborom odgovarajućeg motornog ulja.

Test vučenja motora pokazuje da izbor poboljšivača viskoziteta omogućava da se ulje SAE 10W-40 predstavi slično kao ulje SAE 5W ili SAE 20W-20 u pogledu snage trenja. Multigradna ulja koja sadrže poboljšivače viskoziteta mogu da imaju niži viskozitet u motoru nego u laboratoriji. Zbog njihove nenjutnovske prirode, ona mogu da ponude dodatne mogućnosti za poboljšanje potrošnje goriva.

Za testove vučenja motora izabrana je temperatura vode u prostoru oko cilindra od 85°C. Određena istraživanja su pokazala da temperatura vode u prostoru oko cilindarske košuljice ima znatno veći uticaj na gubitke trenja nego što to ima temperatura motornog ulja [6].

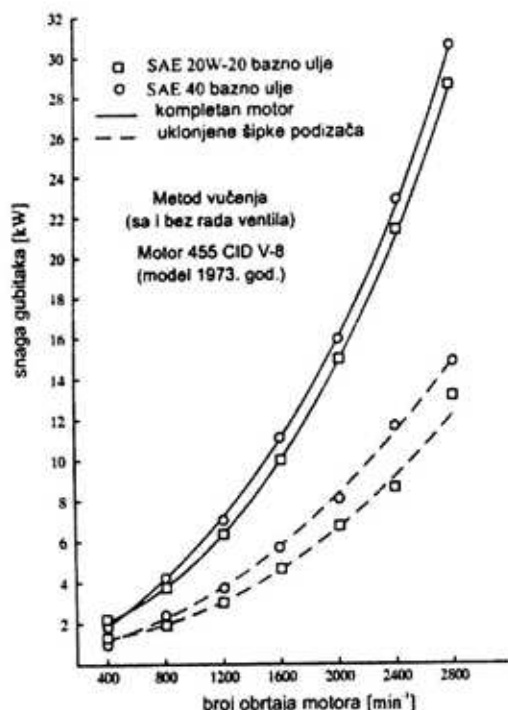
Podaci dobijeni sa dva različita ulja metodom vučenja kompletnog motora i motora sa uklonjenim šipkama podizača ventila (slika 10) pokazuju razliku u gubicima, koja u proseku iznosi 55% i 49% od gubitaka pogona kompletnog motora (SAE 20W-20 i SAE 40 bazno linijsko ulje), respektivno duž celog raspona broja obrtaja pri vučenju motora. Veličina ove razlike gubitaka je, kao procenat ukupne snage gubitaka, u potpunoj saglasnosti sa ostalim studijama.

Pri uslovima manjih brojeva obrtaja i opterećenja, gde je specifična efektivna potrošnja goriva najveća i sa najvećom promenom, srednja specifična efektivna potrošnja goriva opada u zavisnosti od viskoziteta ulja.

Stabilizovana temperatura ulja u koritu motora evoluirala je, u testovima sa sagorevanjem u motoru, u temperaturu vode oko cilindarske košuljice od 88°C. Ova ispitivanja pokazuju povećanje temperature ulja sa povećanjem opterećenja i broja obrtaja. Opterećenje i broj obrtaja imaju direktan uticaj na temperaturu motornog ulja, kao što imaju i temperatura radnog ciklusa i rashladne tečnosti.

Pri temperaturi vode od 85°C oko cilindarske košuljice, monogradna ulja bazne linije pokazuju esencijalan linearni odnos temperature i broja obrtaja pri vučenju. Broj obrtaja pri vučenju ima manji uticaj na temperaturu ulja u koritu kod ulja SAE10W-40 [6].

Raspored i veličina temperature u koritu pri vučenju, u odnosu na testove sa



Sl. 10 – Gubici u motoru pri upotrebi dva različita ulja

sagorevanjem u motoru, pri uporedivim temperaturama rashladnog sredstva, pokazuju ograničenje tehnike vučenja u simuliranju toplotnih uticaja koji postoje u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem.

Mehanizam trenja između pokretnih delova u motoru

Trenje se javlja tamo gde delovi mehaničkog sistema, uz istovremeno prenošenje opterećenja, klize jedan po drugom. Za savladavanje trenja troši se rad, pri čemu dolazi i do trošenja kliznih delova na spregnutim površinama. Veličine trenja i trošenja zavise, uglavnom, od maziva koje se nalazi između kliznih površina, pri čemu stanje maziva, trenje i trošenje uzajamno uslovljavaju jedno drugo. Od stanja maziva u svakom momentu, osim vrednosti sile trenja, zavisi i mogućnost kojom te sile mogu uzajamno da deluju na površinu habanja. Osobine materijala površine trenja i sredina, takode, određuju karakter i vrednost sila trenja koje nastaju. Suština je u tome da se molekulske sile unutar tvrdog tela kompenzuju delovanjem susednih molekula, pa te sile uspostavljaju sjedinjavanje u čvrstom telu. Na površini tog tela molekulske sile se ne kompenzuju u potpunosti, jer postoji težnja za kompenzacijom. Na malim rastojanjima te slobodne (nekompenzovane) molekulske sile imaju veliku aktivnost [7].

Ako se dva tela od istog materijala, sa tehnički simetričnim oblicima površina, sjedinjavaju, onda se to sjedinjavanje ne ostvaruje po celoj površini, nego samo po najisturenijim tačkama. Tehnički, glatke površine, posmatrane u molekular-

noj razmeri, obiluju neravninama. U tačkama dodira na površinama stupaju u dejstvo slobodne molekulske sile i spajaju oba tela u tačkama kontakta toliko jako da njihovo sjedinjavanje postaje jednako čvrstoći samog materijala. Ako se oba tela pomeraju jedno u odnosu na drugo, sjedinjene čestice se odvajaju jedna od druge, pri čemu površinske čestice mogu da se odvajaju od tela, odnosno, može da nastupi habanje.

Pri klizanju različitih materijala jedan po drugom habanje zavisi od vrednosti sila privlačenja koje deluju između molekula dva različita porekla (vrste). Pri prenosu opterećenja između sjedinjenih delova ili pri klizanju pritisci u pojedinim tačkama spajanja mogu da postanu nešto veći, što u tim tačkama plastično deformiše materijal do te mere da se sjedinjene površine povećavaju toliko da mogu da izdrže dato opterećenje. Usled visokog pritiska i pod dejstvom molekulskih sila sjedinjavanja površine trenja se pri određenim uslovima zavaruju. U tom slučaju veoma mala, mnogobrojna i neprekidno obrazovana mesta varova pri klizanju površina se kidaju. Sila neophodna za raskidanje sjedinjenih mesta varova (tačaka), približno odgovara proizvodu stvarne površine sjedinjavanja i otpora smicanja zavarenih mesta. Ta sila uvećava delovanje molekulskih sila spajanja, silama utrošenim na čisto mehaničku deformaciju pomeranja i plastičnu deformaciju metala u hladnom stanju. Kod nepodmazanih metalnih površina ona odgovara vrednosti sile trenja.

Kao molekuli čvrstih tela, tako se i molekuli tečnosti (na primer mazivo) dobro adsorbuju od površine čvrstog tela,

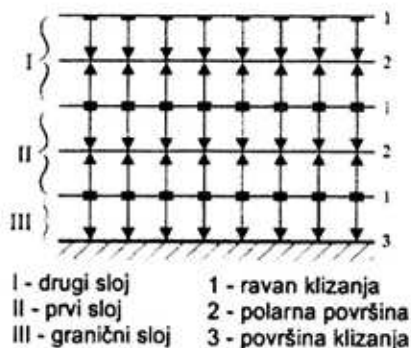
posredstvom slobodnih valentnih veza i čvrsto se drže na toj površini. Isto tako površine čvrstih tela adsorbuju gasove i pare. Tanak sloj maziva, koji se nalazi između dve ravne metalne površine, pokazuje veliki otpor odvajanju tih tela jedno od drugog, ne toliko zbog toga što se sloj čvrsto prilepljuje za metalne površine, već zato što on sam dobija znatnu čvrstoću pod delovanjem molekulskih sila, koje mogu da budu čak i veće od čvrstoće samih metalnih tela. Ako se ta tela prinudno udaljavaju jedno od drugog, iz tih tela mogu da se oslobadaju čestice usled velike čvrstoće mazivog sloja. Pri nepostojanju maziva između kliznih površina reč je o „suvom trenju“. U tom slučaju koeficijent trenja je rezultat delovanja molekulskih sila u dodirnim tačkama i suprotstavljanja smicanju zavarenih delova površine. Samim tim koeficijent trenja zavisi od svojstva materijala i stanja površina. Može se zapaziti da je zbog velike aktivnosti površina, sa fizičke tačke gledišta, veoma teško ostvariti stanje suvog trenja. Svaka čista metalna površina brzo adsorbuje gasove i pare tečnosti koje deluju kao mazivo i utiču na vrednost sile trenja koja se pojavljuje. To dovodi do značajnih poteškoća pri ispitivanju suvog habanja svih vrsta. Stanje poznato pod terminom „polusuvo trenje“ ili „granično podmazivanje“ (nekad jednostavno „podmazivanje“) određuje se fizičkim procesom adsorpcije maziva na kliznim površinama. Molekuli maziva, udruženi molekulskim silama, obrazuju ovde adsorpcioni sloj debljine nekoliko molekula ili čak i jednog molekula – takozvani „granični sloj“, koji se velikom silom priljubljuje uz metalne klizne površine

(slika 11). Pri tome je verovatno reč samo o silama konačne vrednosti, pa je moguće odvajanje sloja maziva pod dejstvom veoma visokih opterećenja.

Ako je čvrstoća prianjanja između sloja maziva i površine metala na nekom mestu narušena, to dovodi do metalnog sjedinjavanja, sa već pomenutim posledicama. Da bi se dobilo „stvarno granično podmazivanje“, podmazujuće sredstvo treba da sadrži ne samo polarne grupe molekula sa velikom dužinom lanca koji se hvata za metalnu površinu, već i takve materije, kao što su masne kiseline, koje hemijski reaguju sa metalnim površinama i obrazuju metalne sapune (soli masnih kiselina sa metalima). Uvode se i druge podobnije materije, na primer trikrezilfosfat koji na metalnoj površini može da obrazuje sloj sa niskom temperaturom topljenja. Zahvaljujući tim hemijskim reakcijama na metalnim površinama dolazi do gubitka metala, odnosno javlja se jedna vrsta habanja. Obrazovanje mešovitog trenja, u čisto mehaničkom smislu, zasniva se na delimičnim površinama klizanja, koje su uvek prisutne u obliku mikroneravnina [7].

Ako je srednja debljina maziva manja od zbira visina mikroneravnina obe površine, dolazi do kidanja sloja maziva, pre svega u tačkama koje su najviše isturene i do dodirivanja metala sa metalom u tim tačkama, iako su drugi, više ili manje širi delovi površine, razdvojeni slojem maziva. Čisto mešovito trenje može da postoji praktično bez habanja i u slučaju ako su površine koje klize jedna po drugoj savršeno glatke, a specifičan pritisak ne prelazi kritične vrednosti, što zavisi od materijala. Površinsko-granični

slojevi maziva ponašaju se, po nekim autorima, kao „kruta tela“. U jednomolekularnom sloju maziva, koje je adsorbirano na površini metala, lančasti dugi molekuli su strogo orijentisani (slika 11).



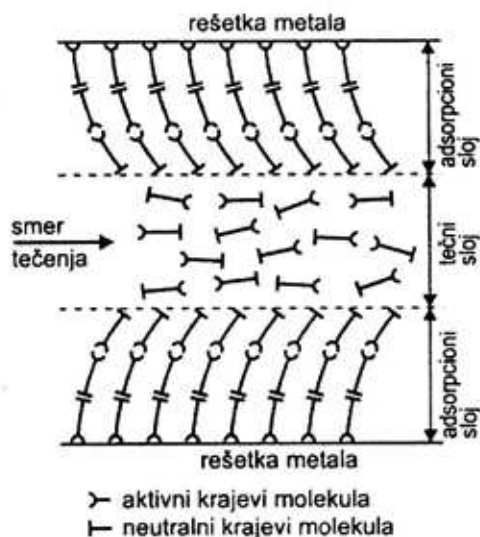
Sl. 11 – Molekulska veza adsorpcionog sloja uljnog filma

Jednim krajem oni su spojeni sa površinom metala, a sa strane sa susednim molekulima. Ta bočna veza očigledno ima suštinski značaj za zaštitu podmazivanih površina. Sa povećanjem temperature, bočne veze usled dejstva toplotnog kretanja molekula postaju slabije, i na kraju na određenoj temperaturi („tački topljenja“ sloja) u potpunosti nestaju. U tom trenutku sloj više ne predstavlja nikakvu zaštitu, jer postaje „tečno“ telo i trenje se naglo povećava. Određeni materijali, na primer masne kiseline, obezbeđuju zaštitu metalnih površina do znatno više temperature nego što je njihova temperatura topljenja, čak do tačke omekšavanja jedinjenja koja su obrazovana sa metalima, na primer metalni sapun. Samo pri temperaturi koja je viša od tačke omekšavanja nastupa skokovito povećanje trenja.

Ako se temperatura i dalje povećava dolazi do drugog skokovitog povećanja trenja. Po nekim autorima ono se objašnjava prelazom mazivog sloja iz „teč-

nog“ u „gasovito“ stanje. To može da se dešava pri takvim temperaturama na kojima granični sloj gubi vezu sa površinom metala. Taj drugi skok može da se dogodi kod mineralnih maziva već na 90°C do 100°C. Moguće je da, čak i pri umerenoj temperaturi, kada se klizne površine obilno „podmazuju“, tj. obezbeđuju mazivom, ono ne bude u stanju da iskaže podmazujuće dejstvo, i u tom slučaju gubici trenja su veliki kao i površinska oštećenja. U tom slučaju, mazivi sloj može da ostvaruje zaštitu površine metala od korozije. Pri tečnom trenju obe površine koje klize jedna po drugoj, u svim svojim tačkama su razdvojene hidrodinamičkim, tj. nosećim slojem maziva. Tada čak i između isturenijih tačaka površina nema dodira. Sloj maziva se nalazi između ranije navedenih adsorpcionih slojeva, koji se nalaze u spoju sa obe klizne površine i sastoji se od više odvojenih slojeva koji leže jedan na drugom i pri kretanju delova klize jedan po drugom (slika 12).

Pri tome se unutar maziva pojavljuje trenje koje treba da se suprotstavi silama koje deluju spolja. Na veličinu tog tečnog trenja, osim debljine adsorbovanih slojeva, utiče i položaj (orijentacija) molekula u sloju maziva između graničnih slojeva. Pri odgovarajućem pomeranju kliznih površina molekuli koji su raspoređeni normalno na površinu okreću se u smeru kretanja. Dugački molekuli maziva, koji se nalaze iznad njih u sloju maziva, postavlju se svojim uzdužnim osama u pravcu tečenja i time smanjuju suprotstavljene trenja u sloju tečnosti. Pri takvoj orijentaciji molekula u tečenju, dinamički viskozitet maziva je manji nego što to pokazuje merenje na viskozimetru.



Sl. 12 – Molekulsko formiranje uljnog filma pri tečnom trenju

Stepen sniženja viskoziteta zavisi od hemijskog sastava molekula maziva, od brzine klizanja i visine podmazujućeg rastojanja između kliznih površina. Povećanje pritiska u podmazujućem sloju može opet da poveća viskozitet. Osim toga, u svakom pojedinačnom slučaju postoji uzajamno dejstvo između materijala tarnih površina, s jedne strane, i maziva, s druge strane. Molekulske sile površinskih slojeva metala koje određuju raspored molekula maziva ne ograničavaju se čvrstim graničnim slojem maziva (debljinom, koja je verovatno jedan molekularni sloj), nego se rasprostiru, pri postojanju debljih slojeva, još dalje (imajući u vidu molekularnu razmeru) u dubinu sloja maziva. Pri tome se molekuli maziva različitom silom primiču graničnoj površini, u zavisnosti od njihove specifične strukture, oblika i dimenzija. Ti molekuli verovatno predstavljaju polarne električno opterećene molekule, koji se svojim aktivnim krajevima čvrsto spajaju sa metalnim površina-

ma. Neaktivni krajevi molekula izlaze u podmazujući sloj i nalaze se zajedno sa takvim istim brojem molekula susednog sloja, pod dejstvom malih orijentacionih sila. Duž tih dodirnih slojeva, pretpostavlja se, može da postoji klizanje sa manjim otporom, koji se naziva otpor trenja klizanja.

Svakoj kombinaciji metala i maziva odgovara sopstvena sila kvašenja. Dodaci u mazivu mogu da imaju aktivirajući uticaj na molekule i time da smanjuju trenje, a samim tim i habanje. Tako deluju, na primer, aditivi organskih kiselina i ricinusovog ulja, kao i sumpor ili hlor u organskim jedinjenjima. Mogu, takode, da se aktiviraju, i granične površine, na primer pomoću grafitnih dodataka u ulju za podmazivanje. Grafit ima sposobnost obrazovanja jednomolekularnog sloja koji se izrazito čvrsto spaja sa površinom metala. Grafitni film formiran na taj način odlikuje se veoma visokom stabilnošću na visokim temperaturama.

Nasuprot suvom i tečnom trenju, mešovito trenje nema tačno određeno stanje – ono se uvek sastoji od oba krajnja stanja, čiji se odnos menja od slučaja do slučaja. Dva različita maziva sa jednakim karakteristikama viskoziteta, koji se pri tečnom trenju ponašaju skoro jednako, pri mešovitom trenju mogu da imaju veoma različite osobine. Koje osobine maziva dovode do tih razlika još nije sasvim jasno. Po teoriji adsorpcije tečnih molekula, na površinama klizanja ulje treba da ima što izraženije osobine smanjenja trenja. Ono mora da bude sposobno da zasiti obilne molekulske sile na površini metala. Tvrde čestice koje se nalaze u mazivu, kao što su

prašina, pepeo, koks i sl., mogu da deluju tako da se stanje mešovito trenja dostiže već na osnovu čisto mehaničkih uslova u okolnostima pri kojima bi trebalo da vlada tečno trenje. Pri tome se narušava polje sila u filmu maziva, tako što suspendovane čvrste čestice utiču na orijentaciju molekula maziva i njihovo adheziono svojstvo u odnosu na klizne površine [7].

I u motorima SUS je trenje i habanje delova povezano sa uzajamnim delovanjem sistema metal–mazivo–metal. Uspešan rad takvog sistema u istoj meri zavisi od osobina obe tarne površine i maziva. Suština samog procesa trenja i trošenja zasnovana je na složenim međusobnim delovanjima između površine trenja i maziva, koje je određeno delovanjem mnogobrojnih faktora: fizičkih, hemijskih, mehaničkih, geometrijskih i kinematičkih [8].

Geometrija određene površine karakteriše se talasastim reljefom sa mikroneravninama, čija je površina obrazovana od kristala koji su raspoređeni bez određenog poretka. Pri mehaničkoj obradi dolazi do veoma intenzivne plastične deformacije metala, usled čega površinski slojevi po dubini do desetak nanometara naglo menjaju osobine. Nakon mehaničke obrade u površini se zadržavaju zaoštala naprezanja sabijanja (korisna) i istezanja (štetna).

U nizu slučajeva površinski slojevi delova se obrađuju specijalnim metodama, kako bi se postigle određene fizičko-hemijske osobine. U takve metode spadaju kaljenje, cementiranje, valjanje, gasno hromiranje, nitriranje, itd.

Pri radu površine delova mogu da pretrpe mnogobrojne promene mikrogeo-

metrije i mikrostrukture u procesu trenja i habanja. Kao rezultat razrade hrpavost se obično smanjuje. Neravnine obrazovane u procesu obrade zamenjuju se neravninama formiranim u procesu habanja. Kao posledica intenzivnih toplotnih i mehaničkih međudelovanja obrazuju se nove strukture metala, nekad bolje a nekad manje odgovarajuće, u poređenju sa polaznom strukturom.

Poznato je da atomi u površini imaju samo jednostavne veze koje su usmerene unutar metala. Rezultat toga je njihova nekompenzovana slobodna energija koja formira elektromagnetno energetsko polje površine i prouzrokuje pojave adsorpcije i privlačenje metala pri trenju.

Visoke temperature koje se stvaraju na površini trenja stimulišu obrazovanje oksidnih slojeva, a njihovo kidanje nastaje zbog mehaničkih uzroka – delovanjem sile trenja i rezultujućom plastičnom deformacijom površine ispod tog sloja. Otpor održanju oksidnih filmova čak je znatno manji nego kod metala, tako da imaju odgovarajuće veliki koeficijent trenja. Oksidni slojevi ne mogu sami da obezbede podmazivanje tarnih površina, što izaziva neophodnost primene maziva koja imaju bolja podmazujuća svojstva od oksida, i to pre svega u uslovima mešovito trenja.

Takvi adsorpcioni granični slojevi imaju veoma veliku čvrstoću na gnječenje, veliku elastičnost pri postojanju normalnog pritiska i obezbeđuju mogućnost lakog klizanja, kao rezultat smicanja po površinama koje su obrazovale prstenaste ili metilne grupe molekula, tj. oni obezbeđuju takozvanu „mazivost“ maziva. Debljina adsorpcionih filmova

obično nije veća od 0,1 nm. Takvi filmovi ne mogu da nivelišu hrapavost površine trenja, čija je visina neravnina, po pravilu, znatno veća, već formiraju mikroreljef površine [8]. Na taj način granični slojevi na čvrstim površinama imaju ogroman značaj za sve procese trenja, habanja i graničnog podmazivanja. Ti slojevi razdvajaju tarne površine kada ne postoji tečno podmazivanje i, ometajući neposredan metalni kontakt, sprečavaju trenje njihovih čistih površina i zavarivanje.

Prirodni površinski oksidni i adsorpcioni slojevi sposobni su da zaštite tarne površine od prekomernog trenja i habanja pri umerenim termičkim i opterećenim radnim režimima. Isto tako, oni nisu otporni i ne obezbeđuju efektivnu zaštitu od habanja pri teškim režimima trenja. Taj zadatak rešava se stvaranjem veštačkih slojeva na tarnim površinama, koji se formiraju u procesu trenja, aditivima protiv habanja i zadiranja, koji se dodaju u motorno ulje.

Postoje mnoge klasifikacije trenja. Neki predlažu da se pri spoljašnjem trenju dve metalne površine razlikuje „trenje idealno čistih (juvenilnih) površina“, kao proces direktnog međusobnog dejstva između njih i „hidrodinamičko trenje“ u uslovima kada se sredina, koja deli čvrste površine, podvrgava zakonima hidrodinamike viskozne tečnosti. Između ta dva granična stanja postoji velika klasa, u praksi važnih pojava „mešovito trenja“. Na mešovito trenje odnose se svi procesi trenja kada su površine čvrstih tela razdvojene veoma tankim adsorpcionim slojevima različitog porekla.

Kod motora SUS u uslovima približnim hidrodinamičkom trenju rade ležajevi kolenastog vratila. Do narušavanja tog režima u ležajevima dolazi pri pokretanju motora, malom viskozitetu ulja ili malom broju obrtaja ili zbog nedovoljnog pritiska ulja. Ispitivanja karaktera podmazivanja između klipnog prstena i cilindra motora pokazala su da u spoljnoj mrtvoj tački i u unutrašnjoj mrtvoj tački postoji granično podmazivanje, a u sredini hoda klipa podmazivanje je približno hidrodinamičkom. Između prstena i košuljice cilindra sve vreme dolazi do smanjenja debljine sloja ulja, dok je pri povećanju brzine kretanja to smanjenje manje izraženo. Smanjenje viskoziteta ulja do vodi do povećanog kontakta prstena i cilindra. Pri porastu temperature dolazi do primetnog smanjenja debljine sloja ulja, što je posledica viskoziteta ulja, i desorpcije polarnoaktivnih molekula na tarnim površinama.

Zaključak

Snaga koja se troši na savladavanje mehaničkih gubitaka u motoru SUS važan je faktor za određivanje performansi i stepena korisnosti motora. Najveći deo tih gubitaka čine gubici usled trenja u motoru, koji nastaju usled relativnog kretanja između čvrstih površina u motoru. Mehanizam ovog trenja je veoma složen, posebno kada se uzmu u obzir i okolnosti nastale konstrukcijom savremenih visokopterećenih motora. Zbog toga je neophodno da se analiziraju mehanički gubici u motoru, i ispituje mehanizam trenja.

Literatura:

- [1] Patton, J. K., Nitschke, G. R., Heywood, B. J.: Development and Evaluation of a Friction Model for Spark-Ignition Engines, SAE 890836, st. 1441-1461.
- [2] Gradin, B. Z.: Analiza mehaničkih gubitaka dizel motora sa direktnim ubrizgavanjem, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2002.
- [3] Petrović, S.: Experimental and theoretical avaluation of friction losses in a four cylinder gasoline engine, Simpozijum Balkantrib, Solun 1996, Zbornik radova, st. 554-561.
- [4] Scheling, H., Freier, R.: Factors influencing the friction power of pistons, MAHLE - Technical Information.
- [5] Thiele, E.: Mechanische Reibungsverluste in Hubkolbentriebwerken, Institut für Kolbenmaschinen, Universität Hannover, 1985.
- [6] Chamberlin, B. W., Sheahan, J. T.: Automotive Fuel Savings Through Selected Lubricants, SAE 750377.
- [7] English, K.: Kolbenringe, Springer - Verlag, Wien, 1958. (превод на руски језик 1962).
- [8] Григорьев, М. А., Пономарев, Н. Н.: Износ и долговечность автомобильных двигателей, Машиностроение, Москва, 1976.