

TRIBOLOŠKI PROCESI U MOTORIMA SA UNUTRAŠNJIM SAGOREVANJEM

Svetislav Marković¹, Miljan Gajić²

svetislav.markovic@ftn.kg.ac.rs, miljangajo@gmail.com

REZIME

U radu je prikazan princip rada motora i tribološki procesi koji se odvijaju prilikom rada motora. Ispitivanja triboloških procesa su opisana u laboratorijskim uslovima rada kao i u uslovima eksploatacije motora.

Ključne reči: motor sa unutrašnjim sagorevanjem, tribologija, tribološki procesi, klipni prsten.

TRIBOLOGICAL PROCESSES IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

ABSTRACT

The paper presents the principle of motor operation and the tribological processes that take place during motor operation. Tests of tribological processes are described in laboratory working conditions as well as in engine exploitation conditions.

Key words: internal combustion engine, tribology, tribological processes, piston ring.

1.UVOD

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 konstruisana 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 smanjenje mase motora u odnosu na snagu, sa svim posledicama na razvoj triboloških procesa.

Imajući u vidu da se od ukupno proizvedene 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 komponentata i sa zaštitom okoline od zagađenja izduvnim gasovima.

2. Tribologija klipnih prstenova

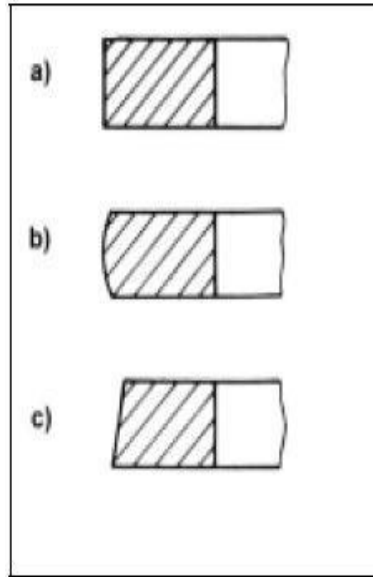
Klipni prstenovi predstavljaju vezu između klipa i cilindra. Nalaze se užljebljeni na klipu. Glavna funkcija klipnih prstenova je u zaptivanju komore za sagorevanje, distribucija i kontrola ulja, prenos toplote i stabilizacija klipa. Vršeći svoje funkcije prsten dozvoljava telu klipa određen stepen termalne ekspanzije.

Prvi klipni prstenovi imali su jedini zadatak, a to je da spreče produkte sagorevanja da dospeju udonji deo kućišta motora. Ovaj razvoj je povećao pritisak na samom cilindru, a time i efikasnost motora. Ramsbottom i Miller su bili među prvima koji su istraživali ulogu klipnih prstenova kod parnog motora. Ramsbottom 1854 godine je konstruisao jednostruki metalni klipni prsten. Slobodan prečnik prstena bio je 10 % veći od prečnika cilindra. Kada je bio postavljen u žljeb klipa, prsten je pritiskao cilindar sopstvenom elastičnošću. Miller je 1862 godine modifikovao Ramsbottom-ov prsten. Ova modifikacija se sastojala od omogućavanja pritiska pare da deluje sa zadnje strane prstena, stoga je obezbedio veću silu zaptivanja. Ovo rešenje je omogućilo korišćenje fleksibilnih prstenova, koje je rezultovalo bolje naleganje na površinu cilindra. [2]

U današnje vreme broj klipnih prstenova na jednom klipu zavisi od vrste motora i uglavnom se kreće od dva pa do pet.

Na samom klipu imamo dve vrste prstenova a to su:

Prsten za kompresiju služi kao zaptivač između klipa i cilindra, onemogućujući izlaz gasovima iz komore. Prečnik prstena u slobodnom stanju je nešto veći od prečnika cilindra, što u konačnom slučaju doprinosi boljoj konformnosti njihovih površina. Pored elastične sile samog prstena boljem prijanjanju površina doprinosi i sila izazvana ulaskom gasova u vertikalni zazor koji stvaraju pritisak na leđnoj površini prstena gurajući ga prema zid cilindra. Distribucija sile na cilindar zavisi i od izgleda čelone površine prstena.



Slika 1. Poprečni preseki prstena za kompresiju (ISO 6621-1)

- a) Obični prsten sa pravougaonim poprečnim presekom. Najčešće je u upotrebi i zadovoljavajućih je karakteristika pri uobičajenim radnim uslovima.
- b) Prsten bačvastog poprečnog preseka zbog oblika čeone površine gasovi iz komore deluju na nju, smanjujući pritisak prstena na zid cilindra što značajno smanjuje habanje u procesu uhodavanja površina.
- c) Profil suženog čela slično bačvastom profilu, zbog oblika čeone površi smanjenje pritisak na zid cilindra i trošenje prilikom uhodavanja. Zbog oblika, veoma je efikasan u skidanju viška ulja sa zida cilindra.

Prsten za kontrolu ulja služi za ravnomerno nanošenje ulja na zid cilindra. Na perifernoj strani prstena mogu da se nalaze žljebovi za odvođenje suvišnog ulja ili prsten svojim oblikom odstranjuje višak ulja. Potreban pritisak na zid cilindra prsten ostvaruje montažom u prednapregnutom stanju ili uz pomoć opruge.

Ova dodatna sila pritiska čini da sam prsten za podmazivanje ima najekstremnije uslove podmazivanja u sistemu. Postojanje prstena za kontrolu ulja nije obavezno na klipnom mehanizmu, nego zavisi od vrste motora.

Npr., kod dvotaktnog motora ulje za podmazivanje se meša sa pogonskim gorivom i takopodmazuje zid cilindra, pa samim tim nema potrebe za uljnim prstenom. [2]

3. Osnovni materijal i materijali za oplemenjivanje površina prstena

Materijal prstena se bira u skladu sa radnim uslovima. Osnovne odlike koje treba da ga krasi su otpornost na oštećenja u vanrednim situacijama, elastičnost i otpornost na koroziju. Sa tribološkog stanovišta sivi liv je dosta pogodan kao osnovni materijal za izgradnju prstena. Pored ostalog odlikuje se efektom suve lubrikacije grafitne faze i sposobnošću sačuvanja lubrikanata što je od izuzetne važnosti za uslove suvog starta ili slične uslove u kojima dolazi do nedostatka maziva. [3]

Slično kao i osnovni materijal i vrstu prevlake biramo u zavisnosti od radnih uslova sistema. Tako se površine izložene delovanju intenzivne abrazije i korozije najčešće hromiraju. Pored hromiranja česte prevlake su: molibden, metalni kompoziti, metalo-keramički kompoziti, keramički kompoziti... Prevlake mogu da se nanose kao samostalne ili kao kombinacija više njih uz uvažavanje kompatibilnosti sa osnovnim materijalom, materijalom sa kojim je u dodiru i lubrikantom. [3]

U skorije vreme svedoci smo sve češćeg prisustva keramike kao zamene metalu (kuhinjskinoževi u domaćinstvu, alati u odradnim sistemima...). S tim u vezi vrše se ispitivanja o mogućnosti primene keramičkih klipnih prstenova, ali za sada samo kao dodacima standardnim metalnim. Neke od keramika koje najviše obećavaju su: monolitni cirkon, sinterovani silikon karbid, silikon nitrid. Značajna prepreka koja još stoji pred njima su im nezadovoljavajuće karakteristike u uslovima nepotpunog podmazivanja.

3.1. Konformnost

Pod konformnošću sistema podrazumevamo sposobnost klipnog prstena da se prilagodi površini cilindra. Usled velikih termalnih i mehaničkih opterećenja, zatezanja glave cilindra i abrazije dolazi do deformacije cilindra u aksijalnom pravcu. Sa druge strane prsten je skoro cilindričnog oblika. Kao posledica ove neusaglašenosti površina, dolazi do nedovoljnog zaptivanja i do povećane potrošnje maziva.

Konformnost površina može da se poveća na dva načina:

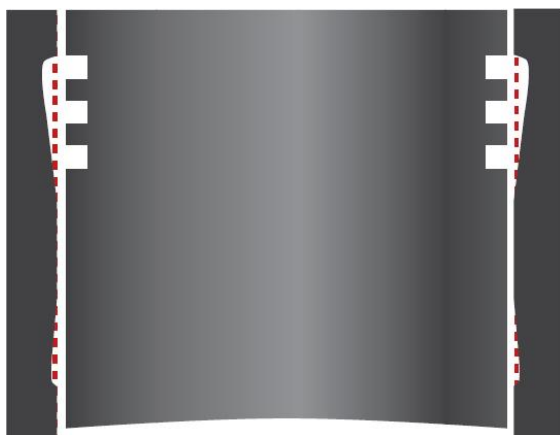
- povećanjem tangencijalnog opterećenja prstena na zid cilindra
- smanjenjem momenta inercije prstena.

Negativni aspekti ovakvog povećanja konformnosti su:

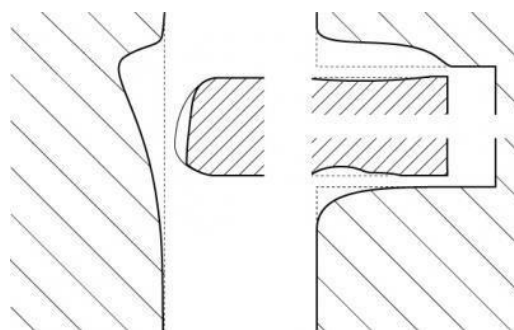
- veće tangencijalno opterećenje na zid cilindra uzrokuje povećanje trenja
 - smanjenje momenta inercije se postiže smanjenjem debljine zida prstena
- a time mu se povećava mogućnost za oštećenje. [3]

3.2. Habanje klipnih prstenova

Tokom eksploatacionog veka motora neminovno dolazi do habanja cilindrične košuljice, klipnog prstena i žljeba klipnog prstena koji se nalazi na cilindru slika(3). Maksimalno trošenje javlja se oko područja gde se menja smer kretanja, a pojačano je pritiskom pogotovo u gornjoj mrtvoj tački. Nešto malo trošenja javlja se i u donjoj mrtvoj tački, ali zbog daleko manjeg iznosa pritiska manja je dubina istrošenog dela. Bočno trošenje smanjuje vek trajanja motora povećavajući potrošnju ulja i tzv. „blowby“ efekt koji predstavlja količinu produkata sagorevanja koja prođe pokraj klipnih prstena u kućište kolenastog vratila.



Slika 2. Šema trošenja cilindra u normalnim uslovima



Slika 3. Prikaz trošenja u gornjoj mrtvoj tački na košuljici cilindra, klipnom prstenu i žljebu klipu

Habanje klipnih prstenova i cilindričnih obloga može se ubrzati trošnim abrazivnim habanjem uzrokovanim manjim abrazivnim česticama ulja za podmazivanje. Čestice zagađivača koje uzrokuju trošenje abrazivnog habanja mogu doći iz ulja ili iz komore za sagorevanje.

Osim abrazivnog habanja, ukupna stopa habanja može biti tribohemijski ubrzana agresivnim komponentama u mazivu koji su ušli u zonu prstena. Agresivni proizvodi sagorevanja se posebno formiraju kada se koriste visoko sumporna goriva.

Što se tiče većine triboloških primena, literatura o uticaju tribohemijskog

habanja na ukupno habanje klipnih prstenova dostupna je u prilično ograničenoj meri. Iskustveno klipni prstenovi sahranom dokazuju da pružaju dobru zaštitu od habanja izazvanih kiselim proizvodima sagorevanja. U uslovima lošeg podmazivanja mogu se pojaviti jake adhezivne sile između klipnih prstenova i cilindrične košuljice, što dovodi do udara klipnog prstena koji obuhvata visoke sile trenja i stvaranje teških ožiljaka na površini klipa, prstena i cilindra. Pored habanja, površinska degradacija klipnih prstenova može se odvijati usled udara vrelih gasova iz komore za sagorevanje, gde je temperature viša od 2 000 ° C. Propuštanje može prouzrokovati lokalnu toplotnu štetu ili oštećenje erozije vrućeg gasa ili ožiljke na prstenovima.

U motorima u kojima se verovatno javlja oštećenje prstenova, upotreba molibdena ili sličnih toplotno otpornih prevlaka je suštinska. [3]

3.3. Habanje u žljebovima klipnog prstena

Habanje paralelnih površina u žljebovima klipnih prstena, odvija se uglavnom u žljebovima gornjeg prstena. Glavni razlog za habanje je kombinovani efekat gasnih sila i radijalnog kretanja prstena, a proces habanja je ubrzan lošim podmazivanjem i visokom temperaturom. Razlozi za radijalno kretanje prstena su distorzija cilindra, sekundarno kretanje klipa i nagib klipa dozvoljen klirensom klipa / cilindra. Velike sile, sile trenja, kretanje aksijalnog prstena i okretanje prstena povećavaju habanje prstena. Instalacioni pritisak gasa i udari gasa mogu uzrokovati radijalne vibracije u prstenu, što ubrzava habanje prstena u kontaktnim područjima.

Kao rezultat habanja, donja površina žleba prstena postaje gruba i zaobljena prema ivici, a gornja površina postaje gruba. Pored deformacije žleba koje proizlazi iz habanja, širina žleba se povećava, a bočni razmak između prstena i žleba se takođe povećava. Alternativno za habanje, tribosistem prstenastog žleba može pasti sa zavarivanjem prstena, kao posledica pregrevanja gornjeg prstena ili parcijalnog zaribavanja klipa usled slabe podmazivosti. U određenim dizel motorima za putnička vozila i sve napredne dizel motore za komercijalna vozila, habanje prstenastih žljebova u aluminijumskim klipovima sprečava se odlivanjem nosača prstena izrađenog od austenitnog Niresist čeličnog liva ili sličnog materijala otpornog na habanje. [4]

3.4. Blago habanje suknjice klipa



Slika 4. Habanje u žljebu klipa

U sklopu rada klipa, blago habanje potisnih i protivpotisnih strana klipa je normalna posledica. U neprekidnim uslovima rada, habanje suknjice klipa je normalno (beznačajno), pošto su hidrodinamički uslovi podmazivanja poremećeni samo promenom kretanja na lokacijama GMT i DMT. Habanje klipne navlake normalno ostaje niska, uprkos smanjenju tvrdoće klipnog materijala na radnoj temperaturi. Za poboljšanje probnih karakteristika suknjice, kao i za obezbeđivanje uslova hidrodinamičkog podmazivanja i niskog habanja, klipna i cilindrična obloga moraju ispuniti određene zahteve glatkosti površine. Vrednosti hrapavosti površine (parametar nije naznačen) u rasponu od 1,5 ... 3 μm su tipični za klipnu suknjicu. Meki premazina suknjice klipa mogu se primeniti za potpomaganje blagog procesa habanja tokom rada paljenja klipa / cilindra. [4]



Slika 5. Normalno habanje košuljice klipa

3.5. Abrazivno habanje klipne suknjice

Kada abrazivne čestice (prašina ili metalne čestice habanja) uđu u klizni interfejs između klipne suknjice i cilindrične košuljice, na površini klipa može se pojaviti oštra abrazivna oštećenja. Habanje je obično praćeno sličnim abrazivnim habanjem na površini cilindra. [4]



Slika 6. Abrazivno habanje suknjice klipa

3.6. Habanje košuljice cilindra

Habanje cilindrične košuljice je u velikoj mjeri prouzrokovana delovanjem klipnih prstenova. Praktična opažanja i teorijske analize pokazuju da je najsnažnije habanje cilindričnih košuljica odvija u blizini gornje mrtve tačke gornjeg klipnog prstena, gde su najteži termički, hemijski, erozivni i abrazivni uslovi. Visok sadržaj sumpora u gorivu može dramatično povećati proporcionalnost tribohemijskog habanja cilindrične košuljice. Najveće habanje cilindrične košuljice je dalje povezana sa GMT drugog klipnog prstena, a u manjoj mjeri sa DMT klipnih prstenova. Ugljenični slojevi iznad prstenastog pakovanja na klipu mogu značajno povećati habanje obloga cilindra u GMT. Poliranje cilindra, koje se može podeliti na lagano, srednje i teško. Poliranje je

prva pojava habanja u cilindru. Lagan stepen početka poliranje povećava potrošnju ulja. Kada je poliranje evoluiralo do faze teškog poliranja, u većini slučajeva dolazi dogubljenja uljnog filma i rapidno povećava habanje. [4]

Termička opterećenja uzrokuju degradaciju maziva starenjem i delimičnim isparavanjem. Hemijska opterećenja obuhvataju razblaživanje gorivom, kiselim proizvodima sagorevanja i vodenim parom iz procesa sagorevanja. Erozivna opterećenja sadrže mehaničko dejstvo ispiranja vrućim gasovima uz gornje delove površine košuljice cilindra i uklanjanje ulja. Habanje cilindrične košuljice dodatno se ubrzava čvrstim ugljeničnim česticama iz procesa sagorevanja, a može i prašinom iz vazduha koji može doprinijeti uzrokovanju abrazivnog habanja. Habanje cilindrične košuljice takođe se javlja u sredini udara klipnog prstena. [4]



Slika 7. Habanje košuljice cilindra

4. ZAKLJUČAK

Klip motora sa unutrašnjim sagorevanjem je prva komponenta mehanizma koji pretvara hemijsku energiju goriva u mehanički rad. Toplota proizvedena u sagorevanju goriva, čiji veliki deo se odlazi na površinu cilindrične obloge pomoću klipnih prstenova, smanjuje tvrdoću i otpornost na habanje klipnih i prstenastih materijala i uzrokuje oksidaciju i isparavanje ulja na gornje zidove cilindra. Vodena para, proizvodi kiselog sagorevanja, ugljenični talozi i čestice koje potiču iz procesa sagorevanja doprinose habanju klipa, prstenova i cilindrične košuljice.

Kada se proizvodi sagorevanja i čestice habanja iz područja klipnog prstena pomešaju u ulje za podmazivanje, na klipnim prstenovima se formira uljna kompozicija sa lošim karakteristikama podmazivanja.

Klip deluje kao zaptivka između komore za sagorijevanje i kartera, a time se podvrgava razlike u pritisku gasa sa jakim varijacijama. Gradijent pritiska gasa preko klipa koristi se za povećanje kontaktnog pritiska između prvog i delimično drugog komprimacionog prstena prema površini košuljice cilindra, dozvoljavajući pritisak cilindra da deluje na zadnjoj strani prstena. Opružna opterećenja prstena su odgovorna za opstanak kontaktnog pritiska. Uljni prsten obično je opterećen snažnijom oprugom i deluje pod tankim filmom ulja nego u proseku. Dozvoljeno je ograničeno curenje gasa za sagorevanje iz komore za sagorijevanje kroz komoru klipa preko prstena na kućište motora, kao razlog za čišćenje prstena i za održavanje punjenja gasa.

5. LITERATURA

[1]. Rec A.: *Tribologija motora SUS - stanje i tendencije*, Tribiologija u industriji, dec. 1994.

[2]. Gradin, B. Z.: *Analiza mehaničkih gubitaka dizel motora sa direktnim ubrizgavanjem*, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.

[3]. Thiele E.: *Mechanische Reibungsverluste in Hubkolbenmaschinen*, Institut für Kolbenmaschinen, Universität Hanover, 1985.

[4]. <http://engineaction.com/FailureManual.pdf>