Dijagnostika na sustavima ulja kod brodskih motora

Budimir, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:164:058967

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository - Faculty of Maritime Studies - Split - Repository - Faculty of Maritime Studies Split for permanent storage and preservation of digital resources of the institution

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

POMORSKI FAKULTET

ANTE BUDIMIR

DIJAGNOSTIKA NA SUSTAVIMA ULJA KOD BRODSKIH MOTORA

ZAVRŠNI RAD

SPLIT, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

POMORSKI FAKULTET

STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO

DIJAGNOSTIKA NA SUSTAVIMA ULJA KOD BRODSKIH MOTORA

ZAVRŠNI RAD

MENTOR: **STUDENT:**

Prof .dr .sc. Gojmir Radica **Ante Budimir (MB: 0243073700)**

SPLIT, 2016.

SAŽETAK

Prilikom uporabe ulja važno je izabrati odgovarajući tip ulja i održavati ga čistim, u granicama dozvoljenih parametara i bez nazočnosti vlage. Ispravan izbor podrazumijeva pravilan odabir baznog ulja, mjesta namjene, ispravne viskoznosti i ispravnih aditiva za odgovarajuću namjenu.

Kontaminacija i degradacija ulja u eksploataciji se ne može potpuno spriječiti ali se mogu znatno usporiti, što je vrlo važno i za ulje i za strojne sustave. Pravilno održavanje ulja omogućuje maksimalnu produktivnost uz minimalne troškove. Pomoću pravovremenih analiza moguće je: ostvarivanje stalnog nadzora svih glavnih sustava stroja, otkrivanje problema u ranoj fazi te ustroj kompletne servisne povijesti stroja i ulja za njegovo podmazivanje. Time se smanjuju kvarovi strojeva kao i troškovi popravljanja, a smanjeni su i troškovi nabave ulja i njegova odlaganja.

Ključne riječi: Ulje, bazno ulje, aditivi, održavanje, analiza

ABSTRACT

When using the oil it is important to choose the right type of oil and keep it clean, with correct specification and without the presence of moisture. The correct choice involves proper selection of base oil, of purpose, the correct viscosity and proper additives for appropriate purposes.

The contamination and degradation of the oil in service can not be completely prevented, or may significantly slow down, which is very important for the oil and for machine systems. Proper maintenance of oil provides maximum productivity with minimal costs. With the timely analysis possible is the realization of permanent control of all the major systems of the machine, detect problems at an early stage and the establishment of a complete service history of the machine and its oil lubrication. This reduces machine breakdowns and repair costs, and decreased the cost of purchasing oil and its disposal.

Key words: Oil, base oil, aditives, maintenance, analysis

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. FIZIKALNA I KEMIJSKA SVOJSTVA ULJA ZA PODMAZIVANJE 2

2.1 MINERALNA I SINTETIČKA ULJA ZA PODMAZIVANJE 5

2.2 ADITIVI 7

2.3 VRSTE ADITIVA 8

3. PODMAZIVANJE 16

3.1 SUSTAVI PODMAZIVANJA BRODSKIH DIZELSKIH MOTORA 19

3.2 FAZNO PODMAZIVANJE LUBRIFIKATORI 22

3.3 POTROŠNJA ULJA 23

4. DIJAGNOSTIKA STANJA ULJA 24

4.1 SOS ANALIZA ULJA 25

5. DIJAGNOSTIKA KVAROVA USLIJED RAZNIH PROBLEMA S ULJIMA ZA PODMAZIVANJE 29

6. ZAKLJUČAK 39

LITERATURA 40

POPIS TABLICA 41

POPIS SLIKA 41

POPIS KRATICA 42

1. UVOD

U ovom završnom radu biti će obrađena dijagnostika na sustavima ulja kod brodskih motora

U ovom radu razmatrat će se :

- tribologija
- fizikalna i kemijska svojstva ulja
- podmazivanje
- dijagnostika stanja ulja
- dijagnostika kvarova uslijed raznih problema s uljima

U prvom dijelu rada biti će opisani osnovni pojmovi, svrha podmazivanja te podjela lubrikanata.

U drugom dijelu rada biti će obrađena sva fizikalna i kemijska svojstva ulja za podmazivanje, razne podjele prema viskoznosti, području primjene, podjela na mineralna i sintetička ulja te podjela ulja s obzirom na vrstu aditiva. Nadalje biti će opisane sve vrste aditiva, te njihova svrha i područje primjene.

U trećem dijelu rada će se opisati tri vrste podmazivanja, granično, hidrodinamičko i mješovito podmazivanje ,te će se opisati sustavi podmazivanja i potrošnja ulja.

U četvrtom dijelu rada će se obraditi dijagnostika stanja ulja, uzročnici degradacije i kontaminacije, posljedice na ulje, te način provedbe SOS analize ulja, te će se navesti izvori čestica pronađenih u ulju.

U zadnjem dijelu rada obradit će se dijagnostika kvarova na elementima koji se podmazuju uslijed raznih problema s uljem.

Razvojem znanosti razvijaju se i sve funkcije vezane za brod i plovidbu. Danas se pri gradnji broda koriste najnovija saznanja o uljima koja služe za podmazivanje brodskih strojnih uređaja i za hidraulične sustave. U brodskom strojnom kompleksu sustav ulja za podmazivanje od vitalne je važnosti za brod jer uključuje prisutnost ulja u gotovo svim pokretnim mehaničkim elementima, kao što su glavni propulzijski strojevi, pomoćni strojevi i uređaji. Bez prikladnog načina podmazivanja i odgovarajućeg izbora maziva te mjera održavanja i ispravne eksploatacije, drastično se može smanjiti vijek uređaja. [2]

2. FIZIKALNA I KEMIJSKA SVOJSTVA ULJA ZA PODMAZIVANJE

Podmazivanje je samo dio veće slike koja se zove tribologija. Tribologija je znanost i tehnologija koja proučava zbivanja na površinama dvaju tijela u dodiru ili relativnom gibanju (triboelementi), ponajprije trenje, trošenje materijala i učinke podmazivanja. Zadaća joj je pronaći odgovarajuće mjere, primjenom kojih se sprječava ili smanjuje trenje i trošenje, to jest postižu se njihove prihvatljive vrijednosti. [11]

Trenje je obično nepoželjno jer uzrokuje gubitak energije i ubrzava trošenje. Gubitak energije i trošenje povećava troškove i ubrzava zamjenu dijelova. Pažljivo korištenje sredstava za podmazivanje smanjuje troškove vlasnicima i operaterima.

Svrha podmazivanja je odvojiti tarne površine tankim filmom materijala, čime se postiže smanjenje trenja između površina. Lubrikanti se mogu znatno razlikovati po svojim fizičkim i kemijskim svojstvima.

Od lubrikanata se očekuje da ispune sve veći broj zahtjeva. Njihova primarna funkcija je razdvajanje kliznih površina (podmazivanje), odvođenje topline i održavanje čistoće komponenata. Sekundarna funkcija lubrikanata je brtvljenje, izolacija, zaštita od korozije, kontrola oksidacije, prevencija pjenjenja, raspršivanje onečišćivača, prijenos energije, ublažavanje udara itd.

Lubrikanti mogu biti plinoviti (koriste se kod brzookretnih centrifuga i ostalih uređaja s ekstremno visokim brojem okretaja po min.), tekućine (ulja), polu krutine (masti), i krutine (površinski premazi koji sadrže metale kao što su olovo i kositar).

Budući da je kod brodskih motora najširа primjena tekućih lubrikanata, odnosno ulja za podmazivanje, ona će se dalje analizirati. [5]

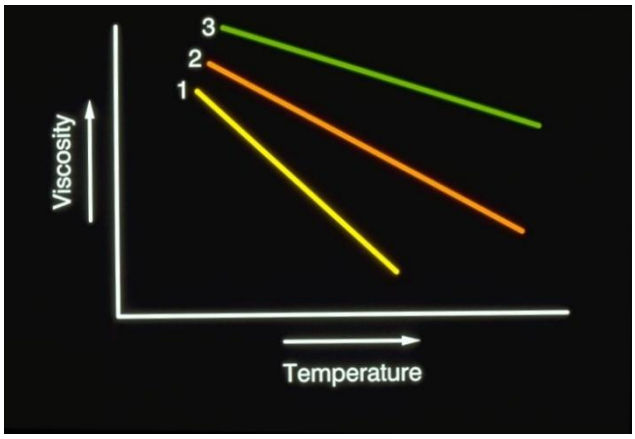
Kod motornih uređaja ulje se koristi za smanjenje trenja između tarnih površina, za odvođenje topline nastale trenjem, za odstranjivanje nečistoće s kliznih površina stapa i košuljice te za neutraliziranje kiselih produkata izgaranja.

Motorna ulja trebaju zadovoljiti sljedeće uvjete:

- viskoznost mora udovoljavati uvjetima rada motora bez obzira na izmjenu temperature u dozvoljenim granicama;
- moraju biti otporna na isparavanje;

- moraju biti otporna prema oksidaciji i starenju;
- moraju imati mogućnost rastapanja čađe i koksa u produktima izgaranja;
- moraju imati zadovoljavajuću mazivost (dobru i trajnu čvrstoću uljnog filma);
- ne smiju biti korozivna. [10]

Ulja za podmazivanje su vrlo složena smjesa pojedinih aditiva i "baznog" (osnovnog) ulja. Za svaku pojedinu primjenu postoji i specifična mješavina ulja za podmazivanje. Ova ulja su podijeljena po svojim fizikalnim i kemijskim svojstvima. Glavna podjela ulja za podmazivanje je po viskoznosti i području primjene. Viskoznost je trenje nastalo pri strujanju fluida zbog različite brzine gibanja njegovih slojeva. Kvaliteta trenja između slojeva tekućine klasificirana je brojem koji se naziva indeks viskoznosti (engl. *Viscosity index - VI*) Viskoznost je najvažnija pojedinačna fizikalna karakteristika ulja za podmazivanje jer ona najviše određuje debljinu uljnog filma. Preciznije, indeks viskoznosti (VI) je definiran kao bezjedinični broj koji označava učinak promjene temperature na kinematsku viskoznost ulja. Što je indeks viskoznosti ulja veći, manje opada viskozitet kako raste temperatura, te se tako održava deblji uljni film. [5]



Slika 1. Indeks viskoznosti (VI) [5]

Društvo automobilskih inženjera (engl. *Society of Automotive engineers – SAE*) osnovalo je numerički kodni sustav za ocjenjivanje razreda motornih ulja prema njihovim karakteristikama viskoznosti. SAE razred viskoznosti uključuje sljedeće, od niske do visoke viskoznosti: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 ili 60. Brojevi 0, 5, 10, 15 i 25 su nadodana sa slovom W , koji označava da su zimska (engl. *Winter*) ili hladni-start razred viskoznost, na

nižoj temperaturi. Broj 20 dolazi s ili bez W, ovisno o tome da li se koristi za označavanje hladnog ili vrućeg razreda viskoznosti. Dokument SAE J300 definira viskoznosti u vezi s tim ocjenama. [5]

Najčešće su u primjeni SAE 10, SAE 20, SAE 30, SAE 40 i SAE 50. Za motore s križnom glavom upotrebljava se ulje SAE 30, te za podmazivanje ležaja i hlađenje stapa, a za podmazivanje cilindara SAE 40 ili SAE 50. Za četverotaktne motore upotrebljavaju se ulja ovih gradacija:

- zimi (SAE 20, SAE 20W, SAE 30)
- ljeti (SAE 30 do SAE 50) [1]

Ulja se dijele i po području primjene koje je uspostavio (engl. *American Petroleum Institute – API*)

Tablica 1. API podjela ulja [5]

API BENZIN	API DIZEL
SB 1930	CA 1940
SC '64 -67	CB '44
SD '69	CC '61
SE '72	CD '88
SF '82	CE '89
SG '88	CF '90
	CG '94
	CH '97
	CI '02
	CJ '10

Ulja za podmazivanje su vrlo složena smjesa pojedinih aditiva i "baznog" (osnovnog) ulja, te uz podjelu prema viskoznosti i području primjene, potrebno je također podijeliti ulja prema kvaliteti njihovih aditiva i baznog ulja. [5]

2.1 MINERALNA I SINTETIČKA ULJA ZA PODMAZIVANJE

Motorna ulja mogu biti mineralna ili sintetička. Mineralna bazna ulja su ugljikovodici dobiveni frakcijskom destilacijom prirodnog zemnog ulja. Neka sintetička bazna ulja su također dobivena iz lakših ugljikovodika. Bazna ulja čine preko 75% volumena ulja za podmazivanje i određuju razna svojstva gotovih ulja za podmazivanje. Mineralna bazna ulja imaju promjenljiv VI, termičku stabilnost, volatilnost (isparavanje pri visokim temperaturama) i otpornost na oksidaciju zbog toga što je svaka pojedina sirova nafta sastavljena od različitih tipova ugljikovodika, te od različitih količina istih. Također imaju različitu koncentraciju i tipove nečistoća. Zbog toga što mineralna bazna ulja sadrže vosak, obično imaju loše karakteristike protočnosti pri niskim temperaturama.

Osnovni nedostatci prirodnih ulja:

- nemaju sposobnost otapanja taloga koji nastaje izgaranjem i starenjem ulja u motoru;
- nemaju sposobnost neutralizacije kiselih produkata izgaranja;
- mala im je otpornost protiv oksidacije.

Sintetička bazna ulja mogu se dobiti iz rafiniranih ugljikovodika, silikona ili estera, te imaju prednosti prirodno visokog VI indeksa, dobru termičku stabilnost, dobru otpornost na oksidaciju, nisku volatilnost i dobre karakteristike protočnosti pri visokim i niskim temperaturama. Nedostatci sintetičkih baznih ulja su da su manje sposobna u zadržavanju oksidiranih produkata nego mineralna bazna ulja, zbog njihove savršenije sintetičke strukture. Također proizvode mnogo jednakih raspadnutih tvari kada se razgrađuju. Nadalje, skuplja su od mineralnih baznih ulja, stoga postoje prednosti i nedostaci korištenja sintetičkih baznih ulja, ali uvjeti rada obično pomažu u donošenju konačne odluke.

Bazna ulja za podmazivanje odlikuju se po:

- boji,
- specifičnoj gustoći,
- sadržaju sumpora i dušika,
- viskoznosti,
- sposobnosti otapanja,
- sposobnosti filtriranja,

- otpornosti na oksidaciju,
- točki gorenja,
- točki paljenja,
- točki stinjavanja,
- točki tečenja,
- kvaliteti destilacije itd.

Točka gorenja (engl. *Fire point*) je temperatura na kojoj je koncentracija pare zapaljive tekućine dovoljna za održavanje izgaranja ili pojednostavljeno, pri ovoj temperaturi će površina zapaljive tekućine nastaviti izgarati. Niska točka gorenja ukazuje na prisustvo znatne količine lakših ugljikovodika, uz to i potencijalnu volatilnost.

Točka paljenja (engl. *Flash point*) je najniža temperatura pri kojoj se para zapaljive tekućine može trenutno zapaliti u zraku. Izgaranje će se događati kratko, te će se naposljetku ugasiti.

Točka stinjavanja (engl. *Pour point*) je temperatura pri kojoj se oblaki ili sumaglica voštanih kristala pojavljuje na dnu uzorka ulja za podmazivanje. Dok vosak čini neznatnu štetu pri visokim temperaturama, ispod točke stinjavanja voštani kristali se povezuju, povećavaju viskoznost i smanjuju protok. Hladna goriva i ulja koja sadrže vosak mogu postati želatinasta ili potpuno prestati teći.

Točka tečenja je najniža temperatura pri kojoj se ulje ili destilat goriva promatra da teće niz uzorak koji se drži horizontalno nekoliko sekundi. Niže od te temperature tekućina će biti toliko želatinasta da neće teći olako zbog gravitacije. Značajna količina voska je prisutna kada tekućine imaju visoke točke stinjavanja ili točke tečenja.

Također je potrebno biti upoznat s pojmovima mulj (engl. *Sludge*) i lak (engl. *Varnish*).
Mulj je mekana, crna, želatinasta emulzija vode i nusproizvoda nastalih izgaranjem kod rada na niskim temperaturama motora. Lak je tvrdi, tanki sloj oksidiranih uljnih proizvoda koji se zapeče na dijelove tijekom rada na visokim temperaturama. Dakle, mulj je povezan s radom pri niskim temperaturama motora, dok je lak povezan s radom pri visokim temperaturama motora. [5]

2.2 ADITIVI

Bez obzira na to koje se bazno ulje koristi, aditivi su potrebni da bi ulja za podmazivanje mogla zadovoljavajuće izvršiti sve zadane funkcije. Aditivi imaju tri svrhe:

- da zaštite ulje za podmazivanje u radu,
- da zaštite dio koji se podmazuje i
- da poboljšaju ili nadodaju korisne značajke ulju za podmazivanje.

Aditivi se mogu podijeliti u tri osnovne grupe:

- poboljšivači viskoznosti,
- poboljšivači podmazivanja i
- oni koji sprječavaju degradaciju/kontaminaciju.

Pojedini aditiv ima specifičnu svrhu koja se ne može izvršiti samo s baznim uljem za podmazivanje. [5]

Dodatkom različitih aditiva prirodnom ulju dobivaju se legirana ulja poboljšanih kvaliteta.

U praksi se legirana ulja nazivaju HD-ulja (engl. *Heavy-Duty Oil*). Legirana ulja imaju kombinirane dodatke:

- u svrhu povećavanja deterdžentskih i disperzijskih svojstava kojima se žele održati metalne površine čiste, dodaju se fosfati, alkohol ili aditivi s velikom molekularnom masom, koji sadrže cink, barij, magnezij ili njihove hidrokside, ali ti aditivi nemaju sposobnost otapanja taloga koji nastaje izgaranjem i starenjem ulja u motoru; u svrhu povećanja otpornosti na starenje i oksidaciju ulja dodaju se sulfidi i fosfati te metali kositar, barij i cink čime se sprječava stvaranje mulja i lakova na metalnim dijelovima kao i korozivno djelovanje bijelog metala;
- u svrhu zaštite metalnih površina od korozivnog djelovanja ulja dodaju se spojevi koji ulju povećavaju otpornost na oksidaciju; dodaju se spojevi s fosforom, sumporom ili dušikom, metalne soli trifosforne kiseline i sl.;
- cilindričnim uljima dodaju se aditivi koji sa stvorenim kiselinama tvore sulfatne spojeve barija ili kalcija disperzirane u ulju. Ti spojevi su na bazi alkil-fenolata barija ili kalcija;
- u svrhu povećanja temperature skraćivanja uljima se dodaju proizvodi kondenzacije kloriranog parafina i naftalina;

- za poboljšanje viskoznosti i otpornosti na povećane temperature ulju se dodaju polimerizirani olefini, izoolefini itd. [10]

Klasifikacija HD-ulja s obzirom na količinu aditiva

- HD M DH (MIL-L-2104A) - ulja,
- HD I Supplement (Series) 1,
- HD 2 Supplement (Series) 2,
- HD 3 Supplement (Series) 3.
-

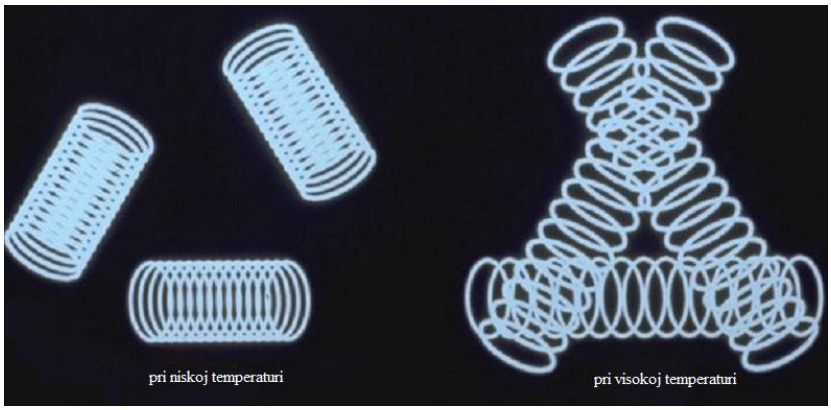
Ulja s dodatkom (supplement) serije 2 i 3 upotrebljavaju se samo u posebnim slučajevima, u najtežim uvjetima rada motora. [1]

Kada se bazna ulja i aditivi pomiješaju, oni ne smiju štetno reagirati ili napraviti štetu okolišu u kojem rade. Ulja za podmazivanje bi trebala biti sigurna za upotrebu, obavljati sve zadane funkcije i pružiti dugi vijek trajanja. [5]

2.3 VRSTE ADITIVA

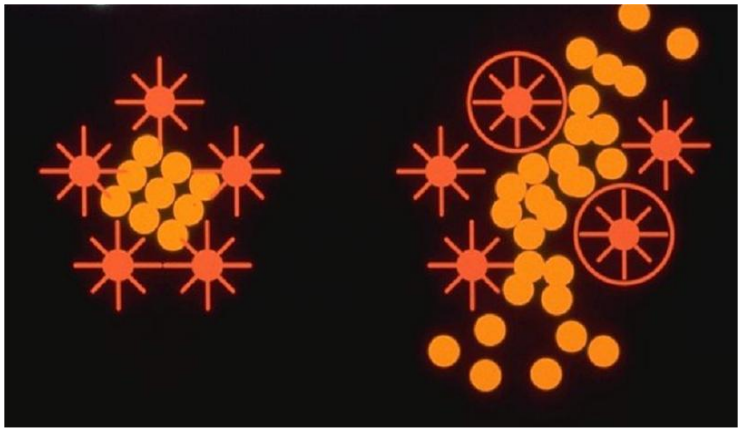
Ponekad će temperature okoliša znatno varirati i samo bazno ulje bi bilo previskozno da bi adekvatno vršilo svoje funkcije pri niskim temperaturama. Proizvođači ulja su proizveli multiviskozna ulja da bi zadovoljili te potrebe. Budući da su napravljena miješajući nisko-viskozno bazno ulje s poboljšivačima viskoznosti (engl. *Viscosity improvers - VI*) i drugim potrebnim aditivima, potrebno je biti svjestan da ako se poboljšivači viskoznosti potroše tijekom rada, da se viskoznost ulja može vratiti na nisku viskoznost baznog ulja za podmazivanje, međutim češći je slučaj da će viskoznost porasti s vremenom rada, zbog trošenja aditiva i oksidacije ulja.

Poboljšivači viskoznosti su polimeri nalik dugim oprugama. Kada su ohlađeni tada su manji, a kada se zagriju tada se šire, te tako postanu veći i pružaju veći otpor protoku ulja. Ako se visoka smična opterećenja primjene na ulje (kao npr kod visokooptereećenih zupčanika) molekule poboljšivača viskoznosti se mogu prekinuti u manje molekule, te tako izgubiti mogućnost povećanja viskoznosti.



Slika 2. Aditivi poboljšivači viskoznosti [5]

Aditivi koji poboljšavaju protok pri niskim temperaturama zovu se umanjivači točke stinjavanja. Djeluju tako da usporavaju nastanak kristala voska ili mijenjajući veličinu i oblik kristala, tako da ne ometaju sposobnost protoka ulja. Kada se dodaju u bazno ulje, snizuju točku stinjavanja bez utjecaja na ostale značajke ili karakteristike rada ulja za podmazivanje.



Slika 3. Promjena kristalne strukture voska usljed korištenja aditiva [5]

Modifikatori trenja se također nazivaju uljni agenti (polarni spojevi koji imaju iznimno visoki afinitet ka metalnim površinama). Ovi aditivi su često topljivi u ulju, netopljivi oblici grafita, molibden disulfidi koji tvore grafit ili molibden disulfidi koji tvore površinske slojeve tijekom rada. Koriste se da bi se osigurao tanki, ali izdržljiv film za umjerene uvjete opterećenja.

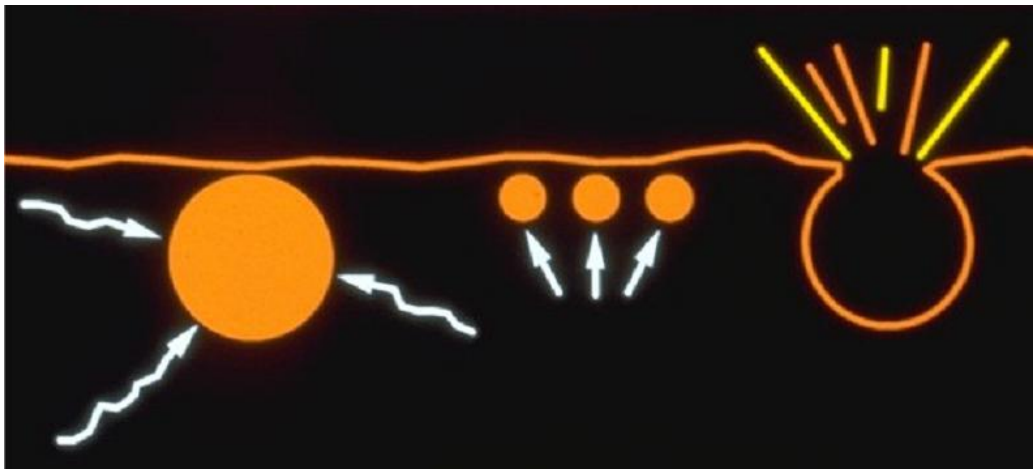
Kada opterećenja postanu veća, potrebni su aditivi protiv trošenja. Oni obično uključuju cink ditiofosfat koji reagira s metalnim površinama i vlagom iz okoline za razvoj slojeva željeznih i cink sulfida, te željeznih fosfata na metalnim površinama. Ovi slojevi imaju mnogo manji

koeficijent trenja od metalnih dijelova. Cink ditiofosfat je također učinkovit inhibitor oksidacije.

Kada je opterećenje vrlo veliko, potrebni su aditivi za ekstremni tlak. To su obično spojevi sumpora, klora ili fosfora, koji kemijski reagiraju s metalnim površinama i vlagom iz okoline za razvoj anorganskih površinskih slojeva korozije. Ove slojeve je teško probiti, ali imaju mnogo manji koeficijent trenja od metalnih površina, čime se smanjuje mogućnost abrazivnog i adhezijskog djelovanja. Tijekom ovih kemijskih reakcija metalna površina korodira. Istraživanja pokazuju da se radni vijek dijelova smanjio za 15% zbog korozivnog djelovanja, stoga se aditivi za ekstremni tlak preporučuju samo za dijelove gdje će radni vijek trajanja biti manji bez korištenja tih aditiva nego s njima.

Tijekom rada, ulja se mogu pogoršati preko pjenjenja, oksidacije, korozije, ulaska kiseline, hrđe i ulaska raznih onečišćenja. Stoga je potrebno da se općenito razumije funkcija i struktura aditiva protiv pjenjenja, sredstava za raspršivanje, deterdženata, inhibitora oksidacije i korozije, te inhibitora hrđe.

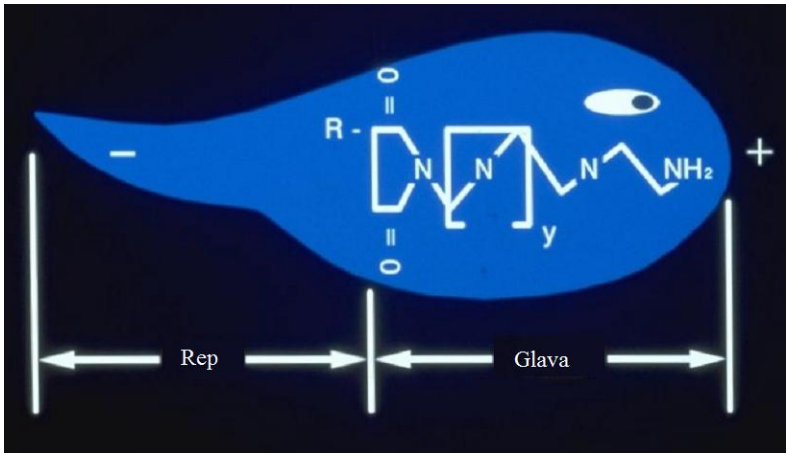
Pjenjenje (ili aeracija) uključuje zarobljavanje mjehurića unutar ulja za podmazivanje. Mjehurići pjene se uglavnom nalaze na površini dok se zračni mjehurići mogu raspodijeliti kroz cijelo ulje. Nastale štete su povećana oksidacija ulja, pumpa dovodi plinove s uljem(tako uzrokujući štetu kao što je adhezija i kavitacijska erozija), prelijevanje rezervoara i gubitak tekućine, nedostatak kompresije u hidrauličkim sustavima. Aditivi protiv pjenjenja se koriste da bi smanjili površinsku napetost molekula tekućine, tako omogućujući mjehurićima da brže izađu i tekućine. Ovi aditivi su obično silicijska ulja i polimeri koji ne samo da smanjuju količinu mjehurića u sustavu nego također smanjuju površinsku napetost postojećih mjehurića, "oslabljuju" ih i čine da se raspuknu u manje mjehuriće ili da se raspuknu potpuno na površini.



Slika 4. Aditivi protiv pjenjenja kao silicijsko ulje [5]

Deterdženti/raspršivači tip aditiva su metalo-organski, bez pepela i polimerni. Njihova svrha je zadržati lak, ugljik, hrđu i ostale netopljive čestice u koloidnoj suspenziji te u nekim slučajevima i neutralizirati kiseline. Kada deterdženti/raspršivači aditivi imaju metalni sastav, ostavljaju metalni pepeo nakon što ulje za podmazivanje izgori.

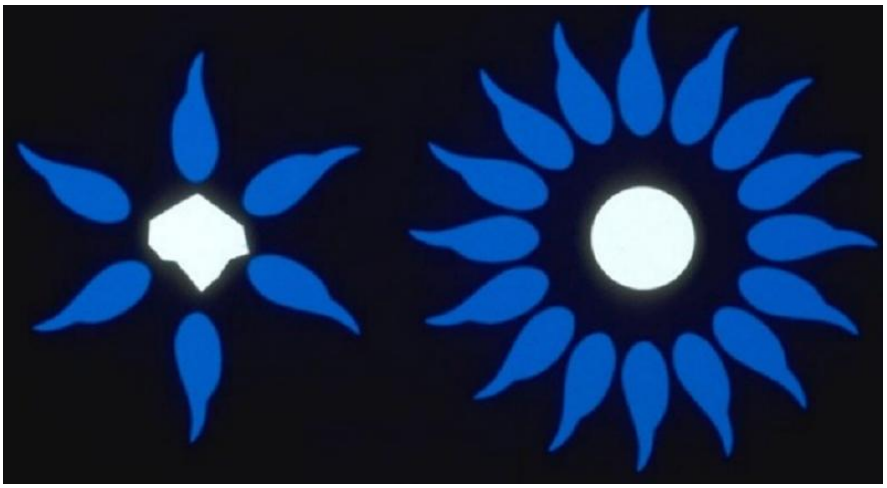
Deterdženti/raspršivači kontroliraju koroziju tako što neutraliziraju kiseline s osnovnim metalima. Oni također zadržavaju netopljive čestice tako što ih okružuju, premazuju i neutraliziraju, te tako sprječavaju povezivanje čestica u veće naslage nečistoća kao što su lak, mulj ili ugljik. Ovi aditivi su obično polarne molekule koje imaju "glavu i "rep". Kraj s glavom ima pozitivan polaritet dok kraj s repom ima negativan polaritet. Bilo koje nečistoće s pozitivnim ili negativnim nabojem privući će molekule aditiva na njih.



Slika 5. Tipična polarna molekula [5]

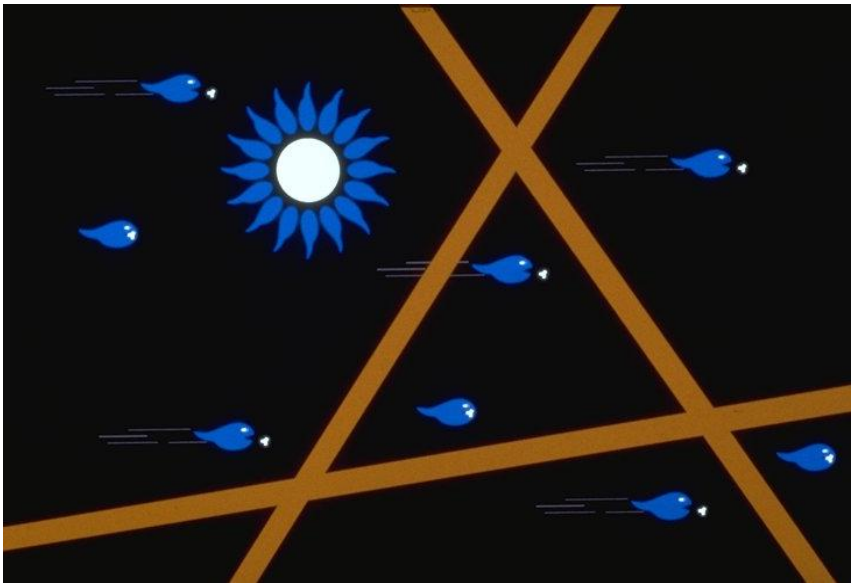
U nekim drugim slučajevima molekule deterdženta/raspršivača biti će privučene na netopljive čestice, te će se na njih zakačiti da bi ih neutralizirali, učinili topljivim i da spriječe da se čestice spoje s ostalim. Ova radnja također započinje trošiti aditive raspršivače.

Neki deterdženti/raspršivači se konvergiraju s netopivim česticama i okružuju ih kao barijera s topivim krajevima repova prema van, tako čineći novu zasebnu grupu koja je topiva u ulju, držeći onečišćivače razdvojenima i raspršenima unutar ulja. Konvergiranje se naziva i peptidna veza, te se nova grupa naziva micele (engl. *Micelle*). Kako aditivi formiraju micele, tako se i troše. Kada se potpuno istroše, mnogo micela će postati nepotpuno , a čestice koje su raspršene će se povezati i "ispasti" iz ulja. Ta pojava se naziva ispad aditiva (engl. *Additive dropout*).



Slika 6. Micele [5]

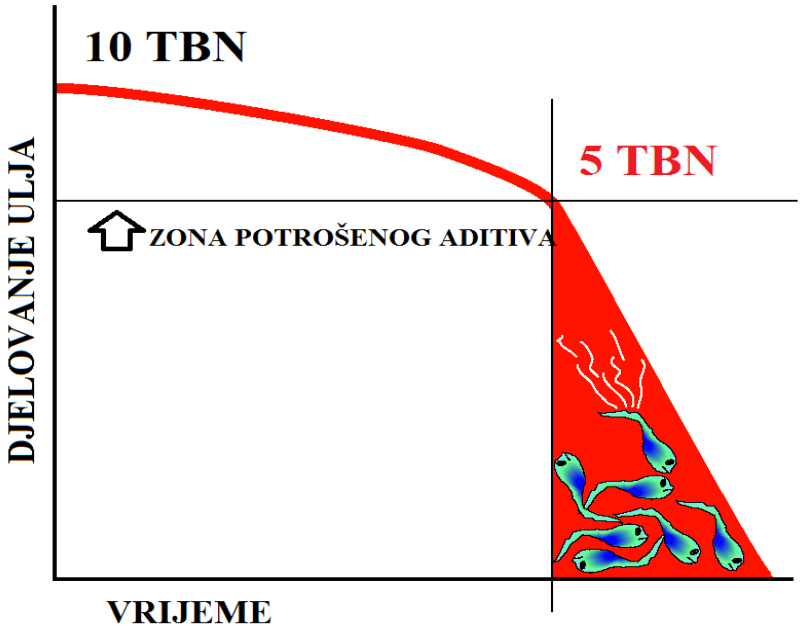
Potrebno je zapamtiti da su ovi aditivi i onečišćenja vrlo mali u odnosu na otvore na uljnom filteru. Na slici 7. su prikazana pojedina vlakna filtera, te sitne čestice i aditivi koji prolaze kroz njih. Intervali održavanja ulja za podmazivanje moraju biti napravljeni tako da se ulje mijenja kada se aditivi potroše.



Slika 7. Odnos veličine aditiva i nečistoća naspram pojedinih vlakana filtera

Ako se interval mijenjanja ulja produži iza vremena istrošenja aditiva, ne samo da ulje više neće vršiti svoju funkciju nego sami aditivi mogu postati štetna onečišćenja u ulju za podmazivanje. Kada se aditivi potpuno potroše, nakupljaju se i stvaraju naslage mulja i podižu viskoznost ulja za podmazivanje.

Na sljedećoj slici se nalazi krivulja koja prikazuje djelovanje ulja za podmazivanje, naspram vremenu u radu. Iz krivulje je vidljivo da ulje postupno gubi radnu sposobnost kako se aditivi troše. Nakon toga dolazi do naglog opadanja vrijednosti djelovanja ulja. Ta zona se naziva zona potrošenog aditiva u ulju. Ispod ove zone, aditivi ne samo da su u potpuno potrošeni i ne vrše svoju funkciju već i sami mogu postati štetni. Zaključak je da se ulje mora mijenjati prije nego što ulje za podmazivanje dođe do zone potrošenog aditiva. [5]



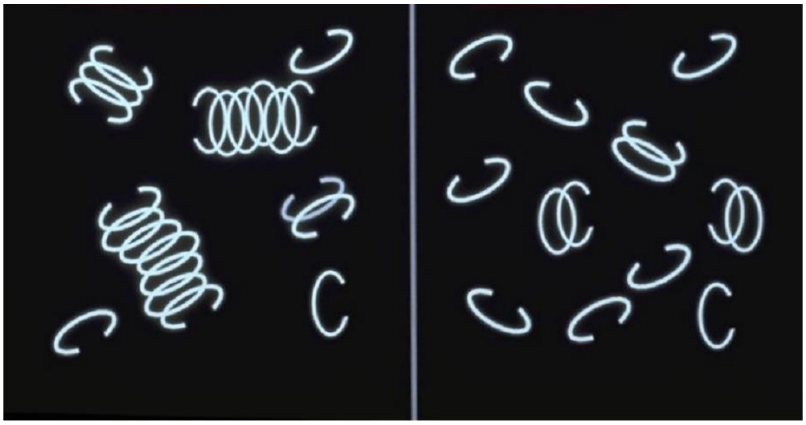
Slika 8. Krivulja djelovanja ulja naspram vremena u radu [5]

Ukupni bazni broj (engl. *Total Base Number - TBN*) govori o alkalnoj rezervi ulja odnosno o rezervi aditiva u ulju i sposobnosti da neutralizira kiseline koje nastaju izgaranjem goriva u cilindru motora. Brojčani iznos TBN je određen vrstom motora za koje je motorno ulje predviđeno. U pravilu, brojčana vrijednost TBN mora biti u ulju koje se nalazi u sustavu podmazivanja, barem koliko i postotni sadržaj sumpora u korištenom gorivu. Zbog toga se kod izbora ulja za podmazivanje motora mora odabrati ulje s alkalnom rezervom mgKOH/g da u toku korištenja i trošenja sprječava nastajanje kiselkastih spojeva u cilindrima. Veličina TBN-a u uljima daje sliku istrošenosti motornog ulja i važan je podatak kod procjene daljnjeg korištenja ulja. Za uobičajena motorna ulja (npr. motornih vozila) TBN iznosi od 7 do 15 mgKOH/g (mg kalijevog hidroksida u gramu motornog ulja). Zadovoljavajuće je TBN=9,5 ako se koriste goriva do 0,05 %S, u koje spadaju bezolovni benzini i eurodizel). Kod upotrebe

goriva s velikim sadržajem sumpora, npr. kod velikih dvotaktnih sporohodnih brodskih dizel motora, motorno ulje ima ukupni bazni broj i do 100.

Totalni kiselinski broj (engl. *Total Acid Number - TAN*) predstavlja mjeru sadržaja kiselina u ulju za podmazivanje, uključujući i jake kiseline nastale izgaranjem goriva a koje su dospjele u ulje za podmazivanje (kod zajedničkog ulja za cilindre i kartere) i od oksidacije ulja. U pravilu vrijednost ne bi smjela prelaziti 3,0 mgKOH/g ulja.
Jaki kiselinski broj (engl. *Strong Acid Number - SAN*) predstavlja mjeru sadržaja jakih kiselina u ulju za podmazivanje nastale izgaranjem goriva a koje su dospjele u ulje za podmazivanje (kod zasebnog ulja za cilindre). Ako je ustanovljen udio jakih kiselina, mora se u roku 48 sati izvršiti tretiranje ulja za njihovo odvajanje iz ulja za podmazivanje. [3]

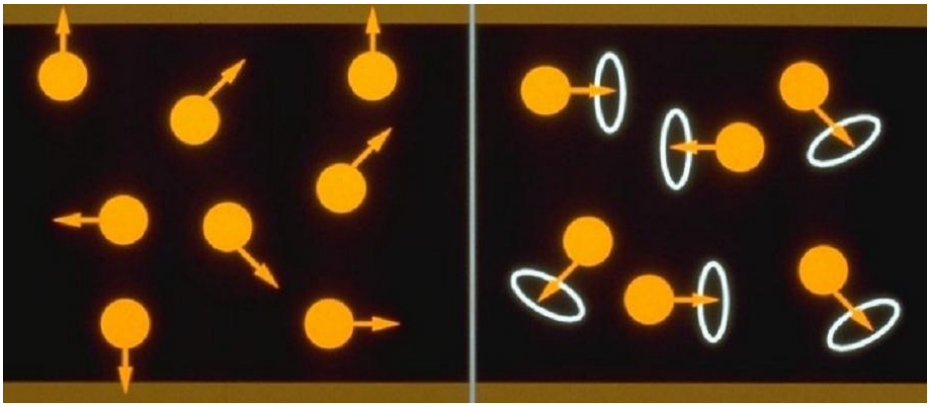
Aditivi za suzbijanje oksidacije i korozije rade zajedno da bi zaštitili metal i održali dobru kvalitetu ulja. Kada ulje oksidira, formirani oksidi u ranim fazama nisu toliko štetni, ali se ti oksidi mogu pretvoriti u perokside i organske kiseline koje korodiraju aktivne metale i djeluju kao katalizatori (akceleratori) ostalih aditiva, te tako formiraju mulj i lak. Oksidacija također potamnjuje boju ulja. Nadalje, kako se oksidacija ulja odvija, tako se viskoznost, potamnjenje i korozija povećavaju dok se protočnost smanjuje.
Oksidirane uljne molekule se privlače jedna na drugu, te imaju tendenciju da se povežu i formiraju veće skupine. Što su skupine veće to je veća i viskoznost ulja. Oksidirano ulje također kemijski unaprjeđuje daljnje raspadanje ostalih aditiva u ulju. Anti-oksidansi rade tako da sprječavaju da se oksidirane molekule povežu i da stvaraju veće skupine.



Slika 9. Prikaz oksidiranih molekula i normalnih uljnih molekula [5]

Istraživanja su pokazala da se nakon 90° C brzina oksidacije otprilike udvostručuje za svakih dodatnih 10° C. Naslage laka se obično nalaze na najvrućim dijelovima koji su izloženi ulju za podmazivanje nakon visokotemperaturnog rada.

Tijekom rada stroja mogu se pojaviti razne kiseline, od kojih neke mogu dospjeti u ulje za podmazivanje. Kiseline se mogu zamisliti kao oštre stvari koje spremno napadaju i oštećuju metalne površine. Inhibitori korozije su obično alkalni materijali koji rade tako da neutraliziraju kiseline i spriječe ih da oštećuju metalne površine.

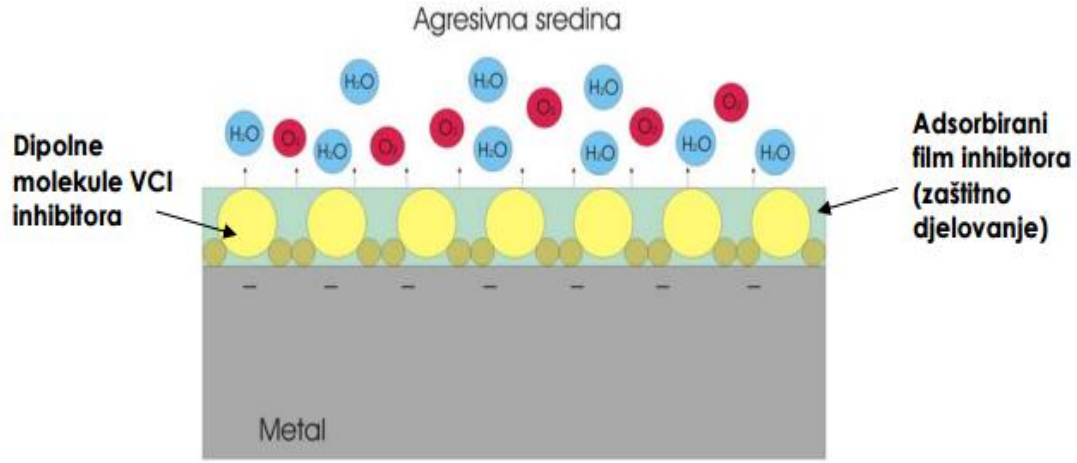


Slika 10. Rad aditiva inhibitora korozije [5]

Nekoliko radnih uvjeta može povećati oksidaciju i koroziju. Visoka radna temperatura i produženo vrijeme ulja za podmazivanje u radu su česti čimbenici koji povećavaju oksidaciju i koroziju. Ako voda dospije u ulje za podmazivanje, može doći do emulzije i značajnog poboljšanja oksidacije, što dovodi do stvaranja kiseline i mulja. Velik broj mjehurića, prisutnih kao pjena ili kao zračni mjehurići u ulju će također pospješiti koroziju. Kada lubrikanti prebrzo oksidiraju, potrebno je prikupiti činjenice u ovim navedenim područjima. Potrebno je ne zaboraviti prikupiti činjenice, koje se ulje za podmazivanje koristilo i provjeriti dali je sadržavalo kvalitetne aditive.

Aditivi protiv hrđe su potrebni da bi spriječili kontakt vode i metalnih površina. Voda može dospjeti u ulje za podmazivanje putem kondenzacije, propuštanjem stapnih prstenova i propuštanja. Ako se ne provjerava, može se nakupiti na metalnim površinama i započeti razvoj hrđe. Aditivi protiv hrđe formiraju sloj na metalnoj površini koji sprječava da voda napravi kontakt s njom. Ovi aditivi su obično polarne prirode i mogu biti metalni sapuni (sapun je metalna sol organske kiseline), esteri, eteri i derivati dibazičnih kiselina. Samo je mala količina aditiva dovoljna da bi obavila normalnu zaštitu protiv hrđe. Ako dođe do

abnormalno visokog unosa vode, ovi aditivi će se brzo potrošiti i može doći do potpunog propadanja ovih aditiva.



Slika 11. Aditivi protiv korozije [5]

U prethodnim dijelovima naveli su se osnovni potrebni aditivi u uljima za podmazivanje danas, ali broj novih aditiva koji se dodaju u bazno ulje se konstantno penje da bi se postiglo bolje podmazivanje i duži radni vijek ulja. Neki od ostalih aditiva u upotrebi su:

- protiv zamrzavanja,
- deemulzifikatori,
- emulzifikatori i
- protiv ljepljivosti.

Ovi aditivi moraju obavljati pojedinu funkciju bez oštećivanja drugih aditiva, baznog ulja ili dijelova koji se podmazuju. Može se uočiti da je danas dizajn sadržaja ulja za podmazivanje zahtjevna znanost. [5]

3. PODMAZIVANJE

Ulja za podmazivanje omogućavaju tri sloja podmazivanja. Granični sloj uljnog filma je tanak sloj koji se formira reakcijom ulja, zraka i metalne površine. Površine elemenata su u međusobnom dodiru i opterećenje se prenosi s jedne na drugu površinu preko neravnina u spregu. Granično podmazivanje se analizira preko promjena vrijednosti koeficijenta trenja u graničnom sloju i koeficijenta trenja na mjestima dodira metala, po jednadžbi:

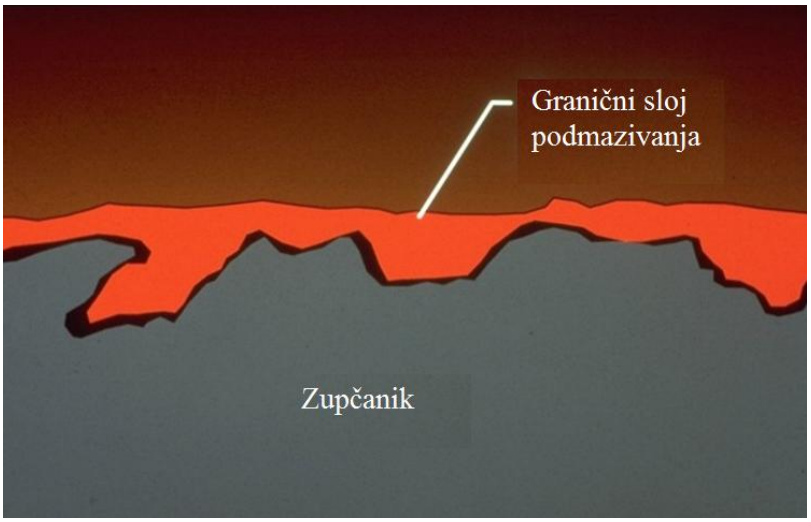
$$\mu = a_w \mu_m + (1 - a_w)\mu_g \quad (1)$$

Gdje je

a_w - dio stvarne površine dodira

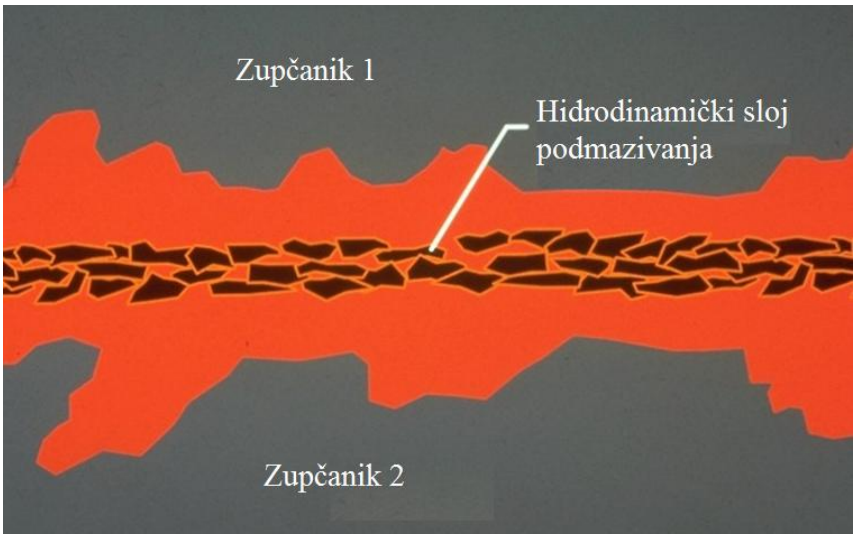
μ_m - koeficijent trenja spregnutih površina metala,

μ_g - koeficijent trenja graničnog sloja.



Slika 12. Granični sloj podmazivanja [5]

U cilju smanjenja trenja i trošenja u procesu graničnog podmazivanja potrebno je osigurati pogodan površinski, odnosno granični sloj. Stvaranje graničnih slojeva postiže se: fizičkom apsorpcijom, kemijskom apsorpcijom i kemijskim reakcijama. Hidrodinamički sloj nastaje povećanjem brzine kretanja površina. Hidrodinamički sloj maziva prikazan je na slici 13.



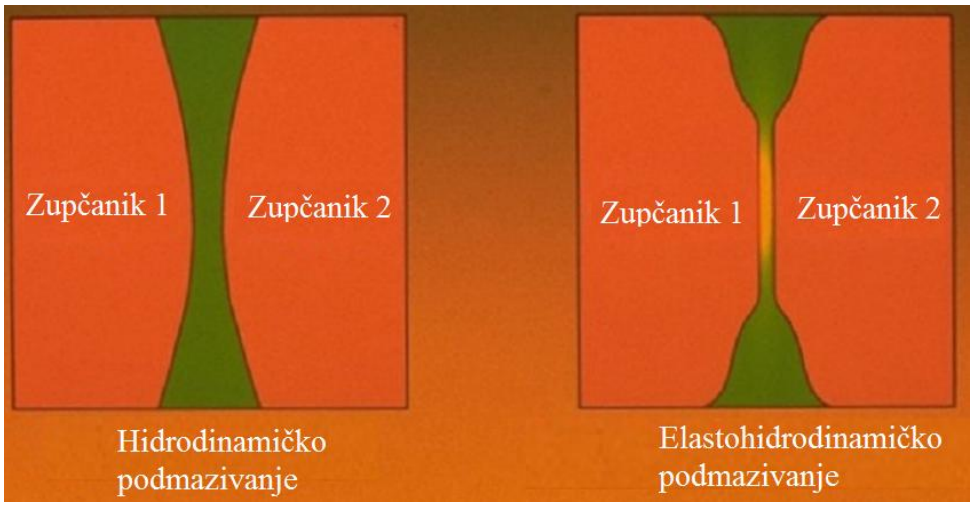
Slika 13. Hidrodinamički sloj podmazivanja [5]

Hidrodinamičko podmazivanje predstavlja način podmazivanja kod koga su površine koje se podmazuju razdvojene kontinuiranim slojem maziva u toku kretanja, odnosno gdje se trenje površinskih reljefa u potpunosti zamjenjuje unutarnjim trenjem čestica maziva. Za vrijeme mirovanja, pokretanja ili zaustavljanja površine se nalaze u direktnom kontaktu.

Elementi mehaničkih sustava kod kojih se ostvaruje hidrodinamičko podmazivanje odlikuju se sljedećim triboloških karakteristikama:

- površine koje se podmazuju razdvojene su kontinuiranim slojem maziva dovoljne debljine tako da ne dolazi do njihovog dodira, osim pri pokretanju i zaustavljanju;
- opterećenje se prenosi s jedne na drugu površinu preko sloja maziva koji posjeduje određenu moć nošenja nastalu kao rezultat relativnog kretanja površina;
- otpor uslijed trenja u sustavu je određen veličinom unutrašnjeg trenja u mazivu.

Debljina uljnog sloja, kod hidrodinamičkog podmazivanja, mora biti veća od zbroja visina površinskih reljefa kliznih površina. Debljina sloja koja je jednaka zbroju visina površinskih reljefa naziva se kritičnom debljinom i ispod nje prestaju zakonitosti hidrodinamičkog podmazivanja. Elastohidrodinamički sloj podmazivanja pri većim opterećenjima i većim površinskim brzinama deformira se elastično. Na slici 14. tanki uljni film je zarobljen između metalnih površina. To je elastohidrodinamički sloj ulja koji može nositi opterećenje.



Slika 14. Prikaz hidrodinamičkog i elastohidrodinamičkog podmazivanja [5]

Za elastohidrodinamičko podmazivanje karakteristično je da se opterećenje prenosi preko velike površine dodira. Međutim, postoje mnogi elementi strojeva (zupčanici, ležajevi i sl.) kod kojih se teoretski dodir ostvaruje u točki ili po liniji. Stvarni dodir je po nekoj maloj, ali konačnoj površini. Mala dodirna površina uzrokuje velika specifična opterećenja, što izaziva elastične deformacije površinskih slojeva i promjenu geometrije površine dodira.

Mješovito podmazivanje predstavlja prijelazni oblik između potpunog i graničnog podmazivanja. Kada je debljina sloja maziva nedovoljna da potpuno razdvoji površine, javlja se mjestimični direktni kontakt površina. Mješovito podmazivanje se javlja u slučaju malih brzina kretanja strojnih elemenata pri visokim opterećenjima. [10]

3.1 SUSTAVI PODMAZIVANJA BRODSKIH DIZELSKIH MOTORA

Kod dizelskih motora podmazuju se cilindri, ležajevi, gornji i donji ležaj ojnica, staze križnih glava, ležajevi razvodnih osovina, ležajevi pomoćnih agregata, ležajevi ventilnih poluga, zupčanici i drugi pokretni dijelovi. [2]

Sustavi podmazivanja brodskih dizelskih motora klasificiraju se prema raznim odlikama.

Prema načinu osiguranja tlaka podmazivanje može biti gravitacijsko, prisilno i kombinirano. U gravitacijskim sustavima ulje u tlačni cjevovod ulazi slobodnim tlakom iz tanka ulja koji je postavljen iznad objekta podmazivanja. Tim se sustavom često podmazuju ležajevi turbopuhala. U prisilnom podmazivanju ulje dolazi do mjesta podmazivanja tlačeno posebnom sisaljkom. U kombiniranom sustavu podmazivanja uključena su oba načina dobave ulja potrebnoga za podmazivanje.

Prema strujanju ulja razlikuje se cirkulacijsko i linijsko podmazivanje. U cirkulacijskom ulje cirkulira u određenom krugu i podmazuje određena mjesta, odakle se cijedi i ponovno potiskuje kroz sustav. U linijskom podmazivanju ulje se dovodi samo jednom do površina koje se podmazuju; takvo je npr. podmazivanje cilindara velikih brodskih motora s križnom glavom.

Prema vrstama ulja rabljenih u motoru, razlikuje se podmazivanje svih dijelova jednom vrstom ulja i s više njih. U nekim motorima rabe se međusobno različita ulja za podmazivanje ležajeva motora, cilindara, turbopuhala, za hlađenje stapova, i to birane kvalitete koja će dati najbolje rezultate u određenim radnim uvjetima.

Prema mjestu gdje se ulje nalazi u motoru razlikuju se sustavi podmazivanja "suhi" i "mokri" karter. U sustavu podmazivanja "suhi" karter ulje koje se dovodi do mjesta podmazivanja cijedi se u karter, a iz njega, obično, slobodnim padom ili pomoću posebne sisaljke odvodi se u posebni tank. U sustavu "mokri" karter, karter služi kao spremnik ulja.
Podmazivanje cilindra različito je za 4T srednjekretne i 2T sporokretne brodske DM. Cilindri 4T motora podmazuju se zapljuskivanjem karterskim uljem, dok sporokretni dizelski motori imaju posebne mazalice.
Pri podmazivanju cilindara, pred ulja se postavljaju sljedeći zahtjevi:

- Odvajanje tarnih površina uljnim filmom;
- Brtvljenje između prstenova i košuljice, te sprječavanje propuštanja prstenova;
- Neutraliziranje kiselih produkata izgaranja koji nastaju pri temperaturama rosišta vodene pare ($SO_2 + H_2O = H_2SO_4$);
- Omekšavanje ostataka čađe koji nastaju pri izgaranju i sprječavanje abrazivnih istrošenja;
- Smanjenje čađenja ispušnog kolektora i plinske turbine, sprječavanje zapečenja prstenova;
- Hlađenja zagrijanih površina uz minimalno izgaranju ulja.

Pri radu motora dio cilindarskog ulja izgara, ali količina koja se dovodi u cilindar ne smije biti prevelika. Naime, zbog nakupljanja ostataka ulja na čelu stapa smanjuje se odvođenje topline usljed čega može doći do pregrijavanja stapova, udaraca u motoru, a u krajnjem slučaju do zapečenja i zaglavljivanja stapova. Pored toga, izaziva zapečenja prstenova i abraziju, poradi

djelovanja krutih ostataka.

Količina ulja za podmazivanje cilindara ovisi o hodu stapa, promjeru cilindra, broju okretaja motora, opterećenju, temperaturama u cilindru, vrsti motora, mjestu postavljanja mazalica, te o vrsti goriva.

Pri određivanju položaja mazalica treba voditi računa o sljedećem:

- Ne smiju se postavljati blizu ispirnih i ispušnih raspora jer bi se ulje skidalo i nakupljalo u ispirnom kolektoru što predstavlja opasnost od požara.
- Ne smiju se postavljati blizu zona s visokim temperaturama poradi prebrzog izgaranja ulja.
- Provrt mora biti dovoljan da se osigura neprekinutost uljnog filma po cijelom opsegu (uljni žljebovi u kojima se ulje zadržava) i visini košuljice (višepojasno podmazivanje za motore s dugim hodom stapa).

Ovisno o vrsti motora, koriste se različite metode podmazivanja cilindara.

Podmazivanje motora s križnom glavom vrši se odvojenim sustavom cilindarskog ulja. Normalna potrošnja iznosi od 0,7 do 1,2 g/kWh. Podmazivanje cilindara motora bez križne glave sastavni je dio jedinstvenog sustava podmazivanja.

U tijeku podmazivanja cilindara ulje mora udovoljiti ekstremnim uvjetima tlaka i temperature. U slučaju da ulje ima prenisku ili previsoku viskoznost, na površini cilindra se neće formirati zadovoljavajući uljni film. Ulje preniske viskoznosti nije u stanju održati uljni film pošto prebrzo isparava pod utjecajem visokih temperatura, a ulje prevelike viskoznosti ne može se dovoljno brzo širiti (razmazati) po površini cilindra da bi stvorilo neprekinuti uljni film.

Uvjeti podmazivanja su se pogoršali kad su se počela upotrebljavati teška goriva koja u sebi imaju veći sadržaj sumpora. To je uvjetovalo potrebu za alkalnim uljima.

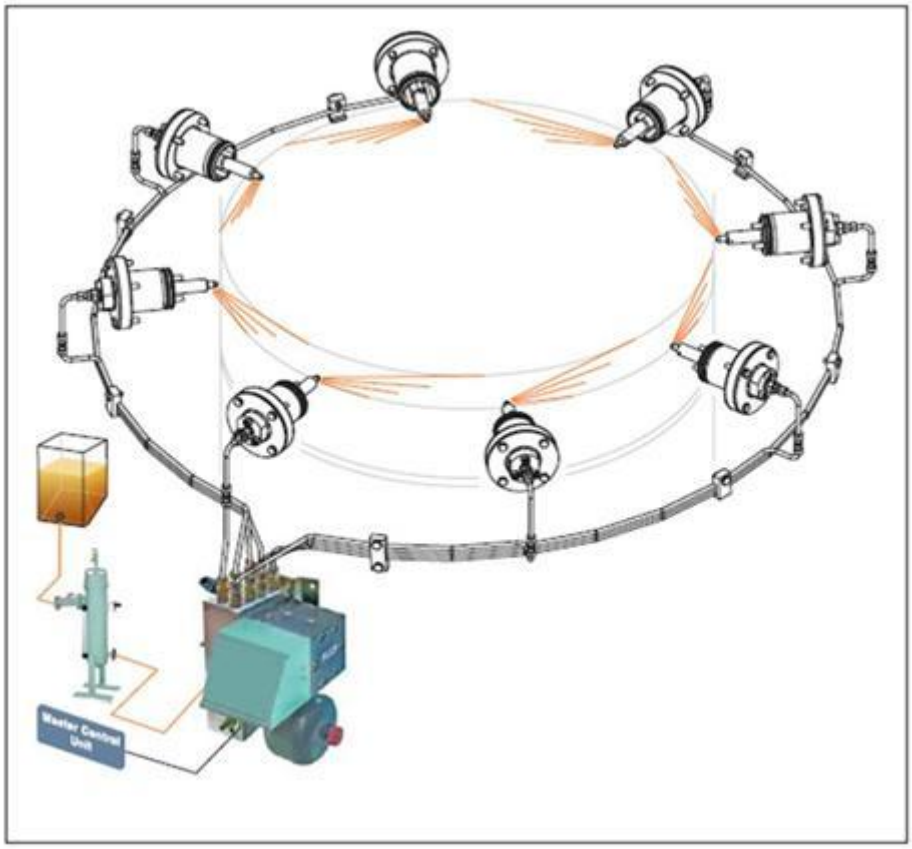
Danas su u upotrebi samo alkalna ulja, a radi se o visokokvalitetnim mineralnim uljima (čiji je indeks viskoznosti oko 100) s dodatkom aditiva koji povećavaju deterdžentna, disperzivna i alkalna svojstva ulja. Što je postotak sumpora u gorivu veći, ulje mora imati veću alkalnu rezervu, kako bi površine cilindra i klipa bile zaštićene od djelovanja kiselina nastalih izgaranjem goriva.

Većina današnjih sporokretnih dizelskih motora koristi cilindarska ulja s TBN = 60 do 70 mg KOH / g (SAE 50) u slučaju kada motor koristi teška goriva sa sadržajem sumpora 1 do 3,5 (max 4,0) %. Za slučaj korištenja teških goriva s preko 3,5 % sumpora, koriste se ulja

s TBN većim od 70 mg KOH/g (do 100 mg KOH/g), SAE preko 50. Ulja SAE 50 s TBN 20 do 25 mg KOH/g koriste se u motorima koji koriste goriva s
0,5 do 1,0 % sumpora. Za podmazivanje motora koja koriste goriva s niskim sadržajem sumpora, ispod 0,5 %, koriste se niskoalkalna ulja s TBN =10 do 15 mg KOH / g, SAE 30 do 40. [3]

3.2 FAZNO PODMAZIVANJE LUBRIFIKATORI

Svrha faznog podmazivanja, je da se cilindarsko ulje doda na površinu košuljice u točno određenom trenutku, tj. kada se stap nalazi neposredno prije GMT. Ulje se ubrizgava u cilindar kad 1.stapni prsten dođe na nepovratni ventil na putu prema GMT. Fazno podmazivanje se u praksi provodi pomoću lubrikatora (klipne pumpice) koji su mehanički pogonjeni od strane motora, a sinkronizirani su s radom motora. Količina ulja koja se ubrizgava na košuljice motora se može regulirati ručno ili automatski. Cilindarsko ulje se ubrizgava preko nepovratnog ventila, a ravnomjerno nanošenje na površinu košuljice osigurava se distribucijskim kanalima na košuljici i stapnim prstenima. [3]
Alfa podmazivanje je elektrohidraulički sustav podmazivanja koji dozira količinu cilindarskog ulja pomoću lubrikatora koji je elektronički pokretan i koji je sinkroniziran s radom motora. Bazira se na ubrizgavanju ulja u točno određenom trenutku pomoću moderne opreme čija se filozofija rada bazira na činjenici da se s poboljšanom kontrolom momenta ubrizgavanja ulja dolazi do uštede potrošnje cilindarskog ulja. Trenutak ubrizgavanja se bazira na signalu koji signalizira položaj koljenastog vratila. Tlak ulja kod elektronski upravljanog znatno je veći od tlaka ulja kod mehanički pokretanog lubrifikatora. To je u komparaciji dvaju sustava također prednost elektronskog upravljanja. Ulje bolje prodire u utor klipnog prstena, učinak podmazivanja je poboljšan. Kod elektronski upravljanog lubrifikatora vrijeme dovođena ulja znatno je kraće u usporedbi s mehanički pokretanim lubrifikatorom.
Prednosti Alfa lubrikatora, osim što omogućava manju potrošnju cilindarskog ulja, dolaze do izražaja u potpunosti kod ME-C motora jer je cijeli sustav Alfa lubrikatora integriran u visokotlačni elektrohidraulički sustav motora. Integriranost u sustav znači da se upravljanje sustavom Alfa lubrikatora vrši elektronskim upravljačkim sustavom motora (eng. ME ECS) a za aktuaciju Alfa lubrikatora koristi se visokotlačni hidraulički sustav ME-C motora. Moguća je samostalna ugradnja Alfa sustava lubrikatora na konvencionalne motore s tim da je tada potrebna ugradnja pumpne stanice i elektronske upravljačke jedinice. [9]



Slika 15. Prikaz alpha sustava podmazivanja [12]

3.3 POTROŠNJA ULJA

Potrošnja ulja računa se po energetskoj jedinici, tj kWh, u gramima ili kilogramima. Motori bez križne glave do 100 kW, kod kojih se cilindri podmazuju raspršivanjem karterskog ulja, troše od 4 do 12 g/kWh, snage od 100 do 750 kW troše 2.5 do 4 g/kWh, a motori snage iznad 750 kW troše od 1.3 do 4 g/kWh. Dvotaktni motori s križnom glavom, kod kojih su cilindri odvojeni od karterskog prostora, troše manje ulja od četverotaktnih motora. Dvotaktni motori s istosmjernim ispiranjem cilindra svježim zrakom troše od 0.27 do 0.8 g/kWh cilindarskog ulja, a cirkulacijskog ulja od 0.13 do 0.2 g/kWh. Dvotaktni motori s poprečnim sustavnom ispiranja troše od 0.4 do 1.5 g/kWh cilindarskog ulja. Potrošnja ulja s Alfa lubrifikatorima iznosi 0.68 g/kWh. [1]

4. DIJAGNOSTIKA STANJA ULJA

Kada ulja za podmazivanje ne uspiju izvršiti svoju funkciju, to indicira mogućnost da je korišteno pogrešno ulje (pogrešni aditivi za područje primjene), zbog degradacije ulja za podmazivanje (propadanje ulja ili potrošenost aditiva, ili oboje) ili zbog kontaminacije ulja (s krutinama, tekućinama ili plinovima.

Kontaminacija i degradacija ulja u eksploataciji se ne mogu potpuno spriječiti ali se mogu znatno usporiti, što je vrlo važno i za ulje i za strojne sustave. Brzina i stupanj degradacije ulja upravo su proporcionalni brzini i stupnju kontaminacije. Zbog toga je važno spriječiti brzu kontaminaciju ulja prije i tijekom uporabe. Spektar kontaminanata ulja dosta je širok, a svaki kontaminant utječe destruktivno na ulje, umanjujući mu fizikalno-kemijske i radne karakteristike, tako da su konačne posljedice skraćivanje radnog vijeka ulja i motora. [10]

Indikatori lošeg ulja za podmazivanje mogu biti tamna boja, loš miris, povećana viskoznost i nakupine laka ili mulja. Nakupine laka se mogu formirati kada motori rade pri visokim temperaturama ili kada dolazi do nepotpunog izgaranja. Mulj se može nakupiti kada motori rade pri niskim temperaturama rezultirajući da nusprodukti izgaranja uđu u ulje za podmazivanje, te tako troše aditive do njihovog potpunog propadanja. Još jedna mogućnost nakupljanja laka i mulja je korištenje loše kvalitete ulja za podmazivanje. Iako lak i mulj indiciraju da ulje za podmazivanje ne radi svoj posao, oni su obično rezultat neodgovarajućih uvjeta u kojima ulje radi. Potrebno je prepoznati nepovoljne uvjete koji im omogućuju formiranje.

Kada ulja za podmazivanje postanu previskozna, kontaminirana ili degradirana, protok ulja može biti smanjen, te sposobnost podmazivanja opada. Zbog toga se događa da visokoopterećeni dijelovi uspostavljaju kontakt metal o metal, te tako stvaraju adhezijsko trošenje i toplinu.

Ulaz abrazivnih čestica u ulje može biti preko komore za izgaranje, sustava ispirnog zraka, propuštajućih brtvi, površina otvorenih tijekom popravaka, prerađenih komponenti itd. Abrazivno trošenje može se minimalizirati uzimanjem ozbiljnih mjera opreza kod rada, servisa ili popravaka.

U sljedećoj tablici nalaze se pojednostavljeni uzroci degradacije ulja i trošenja metalnih dijelova kod dizel motora. [5]

Tablica 2. Pojednostavljeni uzroci degradacije ulja i trošenja metalnih dijelova [5]

Vanjski uzročnici kontaminacije	Gorivo, voda, glikol ili bilo što drugo što ulazi u sustav podmazivanja motora ubrzava degradaciju
Unutarnji uzročnici kontaminacije	Neporavnatost dodirnih površina, nepravilno stegnuti vijci i matice, te neispravni dijelovi. Unutarnju kontaminanti postaju abrazivne čestice koje doprinose daljnjem stvaranju krhotina i abrazivnog trošenja.
Održavanje	Greške i propusti u rutinskom preventivnom održavanju će utjecati na stanje ulja, rezultirajući u povećanom trošenju motora.
Primjena	Okolišni i radni faktori koji direktno doprinose povećanom trošenju i degradaciji ulja.

4.1 SOS ANALIZA ULJA

SOS analiza ulja (engl. *Scheduled oil sampling*) je predviđeno uzorkovanje ulja za podmazivanje.

Za utvrđivanje stupnja degradacije ulja koriste se razne dijagnostičke metode. Najpouzdanije rezultate daju laboratorijske analize ulja. Promjene stanja ulja tijekom uporabe zaključuju se iz nekoliko testova: količine taloga, razrjeđenje ulja gorivom, kemijske promjene u ulju nastale zbog korozije ili oksidacije, stupanj istrošenosti metalnih dijelova.

Temeljem laboratorijskih analiza utvrđuje se stupanj degradacije ulja i temeljem toga se donosi odluka da li je ulje za daljnju uporabu ili ga je potrebno promijeniti. Analiziraju se sljedeći parametri:

Izgled ulja može ukazati da je potrebno izvršiti neke analize, međutim ne postoji točna metoda za definiranje izgleda korištenog ulja;

Sadržaj vode (% v/v) – dozvoljena količina vode u ulju je: za hidraulična ulja 0,1%, a za motorna ulja 0,2%;

Gustoća (kg/m³ na 15° C) – dozvoljena promjena gustoće je 10%;

Točka paljenja (° C) – ovom analizom se utvrđuje prisutnost goriva u ulju;

Kinematička viskoznost (mm²/s) - sniženje viskoznosti može biti posljedica miješanja s uljem niže viskoznosti ili zbog prisutnosti goriva. Porast viskoznosti može biti posljedica kontaminacije vodom ili produktima habanja, nazočnošću čađe, ili produkata oksidacije te miješanja s uljem više viskoznosti;

Sadržaj goriva (%) – određuje se destilacijom, a granična vrijednost je 5%;

Talog (%) – povećava viskoznost ulja i smanjuje mu disperzijska i deterdžentna svojstva, začepljuje filtre ulja i sprječava protok te sljepljuje klipne prstenove. Dozvoljena granica taloga za motorna ulja je 1%;

Nerastvorive materije – one mogu biti proizvodi degradacije ulja i kontaminanti (koks, prašina, organski oksidi, čestice metala nastale habanjem);

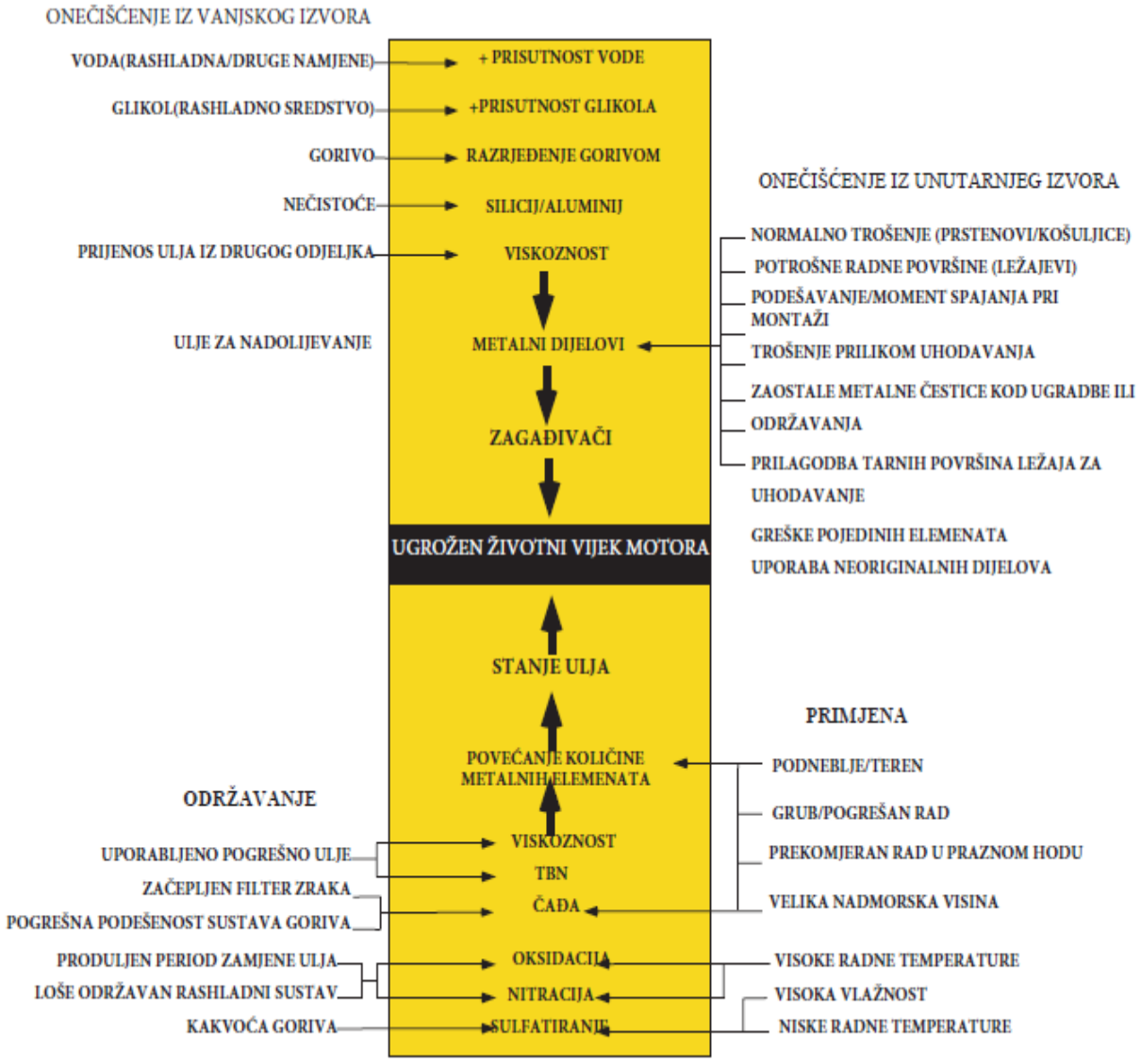
Ukupni bazni broj – TBN – ova analiza je važna samo za motorna ulja i smatra se da ulje treba zamijeniti ako TBN padne za 50 % od početne vrijednosti;
Emisijska spektrofotometrijska analiza – određuje sadržaj različitih metala prisutnih u mazivu. Čestice metala su abrazivne a ponašaju se i kao katalizatori oksidacije ulja. U motornim uljima, porijeklo elemenata može biti iz aditiva, od habanja, iz goriva, iz zraka ili iz tekućine za hlađenje. Metali iz aditiva mogu biti Zn, Ca, Ba ili Mg i ukazuju na istrošenost aditiva. Metali koji potječu od habanja su: Fe, Pb, Cu, Cr, Al, Mn i Ag i ukazuju na povećano trošenje u tim sklopovima. Elementi koji potječu iz rashladne tekućine su Na i B;

Količine čestica u ulju – broj se može odrediti laserskom ili optičkom metodom. Laserska metoda daje količinu, veličinu i distribuciju čestica, dok optička metoda daje i identifikaciju. Često se koristi i kombinacija ove dvije metode. Rezultat određivanja količine pojedinih čestica najčešće se izražava po ISO skali čistoće. Tako se broj čestica izražava odvojeno po veličinama od 5, 15 i 25 mikrona po ml ulja. [10]
SOS analiza omogućava da se maksimalizira produktivnost i da se minimaliziraju troškovi.

Sa SOS analizom može se:

- Otkriti probleme u ranoj fazi te izbjeći nepotrebno vrijeme stajanja stroja kroz isticanje manjih kvarova prije negoli oni postanu kritični;
- Upravljati budžetom kroz predviđanje pregleda, popravaka te životnog vijeka opreme;
- Razviti kompletnu servisnu povijest za svaki stroj (povećavajući vrijednost u slučaju zamjene ili prodaje). [5]

Na sljedećoj slici prikazani su načini kontaminacije i posljedice na uljima za podmazivanje



Slika 16. Načini kontaminacije i posljedice na uljima za podmazivanje [4]

Tablica 3. Izvor potrošenih elemenata u motoru [4]

BAKAR (Cu)	Rupe za osovinicu/ležajevi od; turbopuhala, regulatora, uljne pumpe, osovinica klipa, klackalica, osovinica rolera brijega bregastog vratila, pumpa goriva, kompresora, pumpe za vodu, potisni ležaj, pogon uljne pumpe, uljni aditivi(ne uzrokuju štetu),
ŽELJEZO (Fe)	Košuljice, zupčanici, koljenasto i bregasto vratilo, osovinice klipa, pumpa ulja, pogon usisnih i ispušnih ventila, kompresor, vodilica brijega
KROM (Cr)	Poneki valjni/kuglasti ležajevi, kompresor, prstenovi, ispušni ventili, koljenasto vratilo
OLOVO (Pb)	Površinski sloj glavnog ležaja i ležaja ojnice, površinski sloj ležaja bregastog vratila, ležaj turbopuhala
MOLIBDEN (Mo)	Prstenovi na nekim motorima, mast s molibdenom
ALUMINIJ (Al)	Temeljni ležaj, ležaj ojnice, ležaj bregastog vratila, potisni ležaj, ležaj protutežne osovine, držač klackalice, ležaj uljne pumpe, kompresor, klip
NATRIJ (Na)	Propuštanje rashladnika, ulazak vode, kondenzat, uljni aditivi (ne uzrokuju štetu)
SILICIJ (Si)	Ulazak nečistoća, silicijske masti, aditivi protiv pjenjenja

Interval mijenjanja ulja je određen s mnogo faktora kao što su:

- performanse ulja,
- TBN ulja,
- tip goriva,
- razina sumpora u gorivu,
- brzina potrošnje goriva,
- rad motora,
- kontaminacija ulja. [4]

5. DIJAGNOSTIKA KVAROVA USLIJED RAZNIH PROBLEMA S ULJIMA ZA PODMAZIVANJE

Prekomjerno istrošenje, klipova, cilindara i prstena najčešće je izazvano jednim od dolje navedenih uzroka ili djelovanjem više njih:

- neodgovarajuća količina ulja ili nepravilan rad uređaja za dobavu ulja
- necentriranost cilindra ili iskrivljenje cilindra, koje onemogućava normalno kretanje klipa i prstena kroz cilindar
- neodgovarajuća zračnost klipnih prstena
- preniska temperatura ispirnog zraka
- nepotpuno izgaranje goriva
- upotreba ulja preniske alkalnosti (mala vrijednost TBN) i viskoznosti (mala vrijednost cSt)
- nepravilno uhodavanje košuljice cilindra

Ako je zračnost klipnih prstenova prevelika, doći će do propuštanja plinova izgaranja, a ako je zračnost premala može doći do deformacije prstena zbog nemogućnosti normalnog toplinskog širenja. To u početku izaziva samo povećano istrošenje, a može završiti sa zaribavanjem klipa u cilindru. Pad temperature ispod 90° C uzrokuje pojačano stvaranje sumporne kiseline. Važno je izbjegavati preniske temperature ispirnog zraka, pogotovo kad je vlažnost zraka velika. Preniska temperatura izaziva kondenziranje vlage, što poboljšava stvaranje sumporne kiseline. Najpovoljnija temperatura je oko 42°C. Nepotpuno izgaranje izaziva stvaranje taloga (čađe i koksa). Pažnju treba posvetiti ispravnom raspršenju goriva u cilindru. Pored ispravnosti rasprskača, treba paziti na čistoću i viskoznost goriva. Nakupine čađe omogućuju abrazivno djelovanje. Na izgaranje goriva utječe i količina
dovedenog zraka i njegova temperatura. Preniska alkalnost (premali TBN) omogućava jače korozivno djelovanje na površinama, a preniska viskoznost prekidanje uljnog filma na stijenci cilindra.
Plinovi koji nastaju izgaranjem goriva sadrže u sebi vodu, ugljični dioksid i sumporne okside. Premda najveći dio plinova izgaranja ima visoke temperature, jedan dio plinova se hladi u neposrednoj blizini stijenki cilindra, jer te stijenke imaju puno nižu temperaturu zahvaljujući vodenom hlađenju cilindra. Do kondenziranja sadržaja vlage dolazi uslijed pada lokalne temperature plina ispod određene vrijednosti. Korozivno istrošenje je najizraženije pri niskim

opterećenjima i nakon zaustavljanja motora, jer su upravo tada temperature motora niže i lakše dolazi do kondenziranja vlage i stvaranja sumporne kiseline. Za rad motora pri niskim opterećenjima preporučljivo je povećati dobavu ulja za podmazivanje, a poslije zaustavljanja dobro je napraviti nekoliko okretaja uređajem za okretanje radi zaštite površina s uljnim filmom. Takvim načinom omogućava se ostajanje zaštitnog uljnog filma prije nego li se motor ohladi. U normalnim uvjetima podmazivanja klip i klipni prsteni odvojeni su od površine cilindra slojem ulja, ali pri malim brzinama klipa taj sloj se može prekinuti. [3]

Kod analiziranja klipova, prstenova i košuljica u kvaru potrebno je prikupiti činjenice o osnovnoj primjeni, radu i održavanju. Trebaju se zabilježiti razine rashladne vode i ulja za podmazivanje, razrjeđivanje ulja gorivom ili rashladnom tekućinom, puknute ili nedavno zamijenjene cijevi za hlađenje, potrošeni remeni ventilatora, povećane postavke poluge goriva, iščupani ili iskidani filteri zraka i ostali fizički indikatori abnormalnog stanja. Analiza goriva i SOS analiza su jednako važne kao i analiza klipova, prstenova i košuljice. Potrebno je i provjeriti stanje sustava mjesec ili dva prije kvara i tražiti specifične probleme kao što su neuobičajeno opterećenje, visoke ili niske temperature, curenja, ili niska razina hlađenja rashladnika koji mogu dovesti do kvara.

Znak rasprskača goriva koji propušta je erozija oboda kratera na glavi klipa i vanjskog obujma klipa koja ostavlja grubu, zacrnjenu, kao šljunčanu površinu. Prekomjerno curenje goriva može isprati uljni film na košuljici i uzrokovati zaribavanje plašta klipa. [7]



Slika 17. Erozija uzrokovana propuštanjem rasprskača goriva [7]

Znak za nedovoljno hlađenje ispod glave klipa je obično, teška, crna diskoloracija unutar klipa koja se nastavlja do provrta za osovinicu klipa. Diskoloracija je rezultat toplinske oksidacije ulja. Budući da predugi intervali mijenjanja ulja i loša kvaliteta ulja mogu uzrokovati sličnu pojavu potrebno je prikupiti činjenice o intervalu održavanja i stanju ulja.



Slika 18. Diskoloracija uzrokovana nedovoljnim hlađenjem klipa [7]

Ukoliko se ovakva diskoloracija pojavi na svim klipovima znači da postoji problem u radu sustava za podmazivanje.

Razlozi za zaribavanje klipa su:

- nedovoljno hlađenje
- nedovoljno podmazivanje
- iskrivljena ili puknuta košuljica

Zaribavanje plašta klipa je učestalije nego zaribavanje glave klipa. Aluminij kod provrta za osovinicu klipa/plašt klipa miješa nečistoće u uljni prsten, gdje se nakupljaju, što uzrokuje gubitak kvalitete rada uljnog prstena. Rezultat toga je "hvatanje na četiri kuta" klipa. Kako zaribavanje napreduje, cijeli plašt klipa može biti uključen u procesu zaribavanja, sve dok se klip potpuno ne zariba u cilindru, što uzrokuje zaustavljanje motora ili puknuće klipa.



Slika 19. Klip u procesu zaribavanja [7]

Nedovoljno hlađenje može biti uzrokovano zbog neispravnog rada rashladnog sustava kao što su cijevi koje propuštaju, popuštene spojke, puknuti remen ventilatora i istrošeni impeleri pumpi vode. Naslage na košuljici mogu uzrokovati smanjenje hlađenja.
Glavni razlozi nedovoljnog podmazivanja su nedostatak mlaznice ulja na košuljici, ispiranje ulja viškom goriva u komori izgaranja i hladno pokretanje motora.
Višak goriva u komori izgaranja može uzrokovati habanje tako da se ispere uljni film. Znakovi ovakvog tipa habanja su na glavi klipa, budući da je podmazivanje ispod glave klipa donekle normalno dok ne nastupe sljedeći stadiji kvara. SOS analiza također može pokazati razrjeđivanje ulja gorivom.



Slika 20. Prikaz erozije glave klipa koja rezultira zaribavanjem [7]

Znak hladnog starta je adhezijsko trošenje u centralnom djelu plašta klipa. U uvjetima niske temperature, dovod ulja kasni, a ostatni film ulja je nedovoljan da bi površine ostale razdvojene.



Slika 21. Adhezijsko trošenje kod hladnog starta [7]

Habanje kompresijskih prstenova uzrokovano je zbog problema s kvalitetom ulja i kompresijskih prstenova. Problem kvalitete ulja može biti rezultat krive viskoznosti, prekomjernog zagrijavanja i oksidacije ulja, prekomjerne kiseline u ulju, predugi period mijenjanja ulja i abrazivna kontaminacija ulja. Problem kvalitete prstenova je obično rezultat nepravilne proizvodnje.



Slika 22. Trošenje prstenova zbog loše kvalitete ulja [7]

Detaljan pregled prstenova pokazuje zamazanu površinu koja nije oljuštena i nije oštećena. To ukazuje da je problem s prstenovima malo vjerojatan već bi pažnju trebalo obratiti na kvalitetu ulja.



Slika 23. Prikaz zamazane površine klipa i prstenova koji ukazuje na problem s uljem [7]

Kanali za kompresijske prstenove su prepuni ugljikom, tako da prstenovi ne mogu adekvatno sjedati, rezultirajući u prekomjernom tlaku prema površini košuljice i abrazivnom trošenju. Uslijed pregleda utvrđeno je da korisnik nije koristio pravilan razred ulja i gustoću, te su

intervali mijenjanja ulja bili preveliki. SOS analiza pokazala je da su aditivi bili potrošeni i u nemogućnosti da kanale održe čistima.



Slika 24. Nakupine ugljika u kanalima za kompresijske prstenove [7]

Uzrok abrazivnog trošenja:

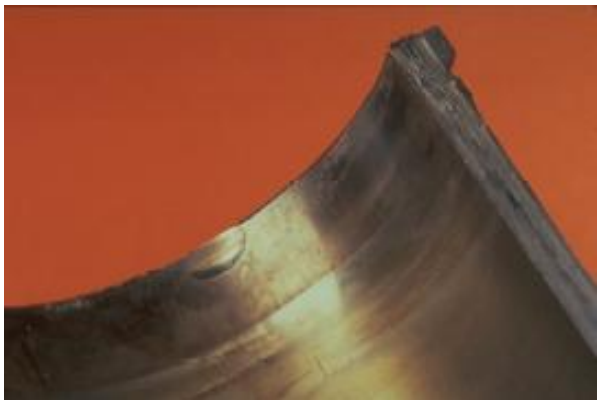
- nepotpuno izgaranje
- degradirano ulje
- rad u hladnim uvjetima kod pokretanja motora
- kontaminirano ulje
- kontaminirani usis zraka
- zašporkane košuljice

Znakovi nepotpunog izgaranja, degradiranog ulja i hladnog rada su čađave naslage koje se nakupljaju na gornjoj strani klipa i na čelu klipa iznad prstenova.
Kada klipovi mijenjaju smjer kretanja u gornjoj mrtvoj točki, na glavu klipa abrazivno djeluju naslage na košuljici koje uzrokuju trošenje materijala.



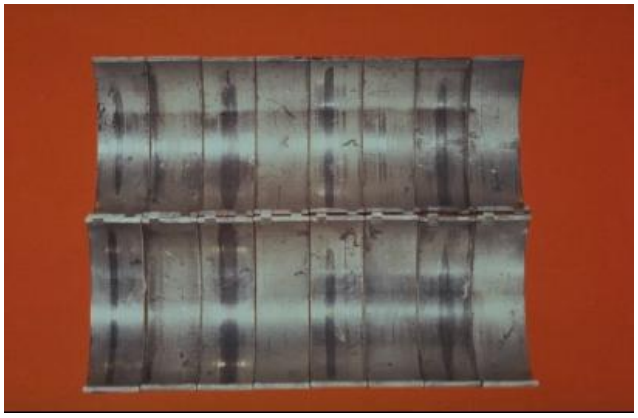
Slika 25. Abrazivno trošenje zbog naslaga ugljika na vrhu klipa [7]

Motori koji rade na preniskoj temperaturi uzrokuju kondenziranje ispušnih plinova koji proizvode kiseline. Obično uljni aditivi neutraliziraju kiseline, ali kontinuirana proizvodnja kiselina može povisiti kiselost ulja iznad prihvatljivih granica. To rezultira rupičastom(engl. *Pitting*) korozijom koja uzrokuje povećano trošenje košuljice i povećanu potrošnju ulja. [7]



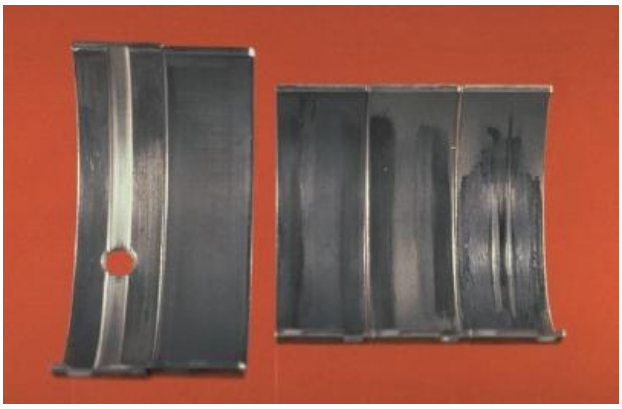
Slika 26. Tipični znakovi rupičaste korozije [7]

Adhezijsko trošenje nastaje kada površinska temperatura postane previsoka, što uzrokuje topljenje slojeva ležaja što uzrokuje prianjanje za koljenasto vratilo. Uzrok ovakvog oštećenja je: nedostatak ulja u karteru, niska razina ulja što uzrokuje da pumpa izgubi potisak, kosi rad, curenje, trošenje ulja, kriva viskoznost ulja, nepravilni uljni aditivi, razrjeđivanje ulja, neporavnanje, prekomjerni zazori.



Slika 27. Adhezijsko trošenje zbog niske dobave ulja [6]

Prilikom niske dobave ulja, manjak ulja je na centru ležaja zbog toga što je uljna rupa u koljenastom vratilu skuplja ulje iz centra ležaja, te to uzrokuje povećanje topline i naposljetku adheziju.



Slika 28. Adhezijsko trošenje zbog loše kvalitete ulja za podmazivanje [6]

Na slici 28. motor je radio nekoliko dana sa znatnim curenjem rashladne tekućine u ulje, što je snizilo kvalitetu ulja i zaustavilo motor. Neki od ležajeva su zaribali dok drugi pokazuju znakove adhezijskog trošenja.

Adhezijsko trošenje može napredovati sve do aluminijskog sloja, pa i do čeličnog sloja. Kako adhezija bude napredovala ležaj će zaribati i okretat će se u provrtu. Na slici 29. do adhezije je došlo kod starta motora jer je operator zaboravio nadopuniti novo ulje nakon mijenjanja starog. Motor je radio samo nekoliko minuta do zaribavanja.



Slika 29. Adhezijsko trošenje do aluminijskog sloja [6]

Kada ležajevi rade bez ulja za podmazivanje, temperature će se popeti i do 430° C, te će čelično kućište ležaja omekšati i raširiti.



Slika 30. Puknuće čeličnog kućišta ležaja zbog nedostatka podmazivanja [6]

Abrazivno trošenje nastaje kada strane čestice prijeđu debljinu uljnog filma, ili kada oštećenja na trošnim površinama uzrokuju nepravilnosti koje prelaze debljinu uljnog filma. Površine ležaja su posjećene i izdubljene ako su tvrde čestice ušle, ili su oguljene i ukopane ako su ušle meke čestice. Kada površine postanu toliko grube da ih uljni filmovi ne mogu razdvojiti, razvija se toplina i adhezijsko trošenje. Uzroci abrazivnog trošenja su: strani materijal ostavljen u uljnim kanalima tijekom postavljanja, nefiltrirano ulje s česticama ugljika i samo proizvedene krhotine, hrapave trošne površine, krhotine od popravaka.



Slika 31. Abrazivno istrošenje uzrokovano tvrdim česticama [6]

Abrazivno oštećenje uzrokovano tvrdim česticama je najlakše prepoznatljivo. Oštećenje su uzrokovali veliki komadi čelika ostavljeni nakon postavljanja koljenastog vratila. Kada je motor pokrenut, protok ulja gurnuo je komadiće u ležaj te je to uzrokovalo užljebljivanje centra ležaja. Pobliža inspekcija je utvrdila da su čelični komadići napravili užljebljenja i da ih se mnogo usadilo u meki sloj legure olova i kositra i sloj aluminija.



Slika 32. Tipično abrazivno oštećenje [6]

Ležaj na slici 32. ima manje ozbiljno abrazivno oštećenje i ovo je tipično oštećenje koje je uzrokovano kada su filteri neispravni ili su intervali zamjene predugi.



Slika 33. Ležajevi koji su zacrnjeni zbog prekomjernog udjela ugljika [6]

Ležajevi koji su zacrnjeni zbog prekomjernog udjela ugljika počet će gubiti svoju klizavost i sposobnost ugibanja. Kod starta motora trenje će biti prisutnije i proizvesti će se više topline. Takvi ležajevi će se polako oštećivati dok ne dođe do adhezije.

Kada se presjeće ovakav ležaj, pod povećalom se može vidjeti da je dosta sloja legure olova i kositra istrošeno i sa svakim novim pokretanjem motora sve će se više trošiti. Kada se pojavi crnilo na ležaju treba prikupiti činjenice o načinima kako višak ugljika može biti prisutan u ulju.

Kavitacijska erozija je normalna na ležajevima ojnice i na glavnim ležajevima nakon dugog vremena rada ležaja. Zarobljena isparenja u ulju za podmazivanje će stvoriti mjehuriće u području niskog tlaka. Kada mjehurići uđu u zonu visokog tlaka zarobljeni u uljnom filmu,

tada implodiraju. Brzina implozije može biti nadzvučna, šaljući ogromnu silu na malo područje ležaja. Sloj legure olova i kositra je mekan i nakon ponavljajućih implozija mala područja razviju puknuća od zamora. Nakon toga se čestice legure olova i kositra oslobode i otplutaju u uljni film, te tako čine abrazivno trošenje. Mogući izvori parnih mjehurića i erozije su: ograničen protok na ulazu pumpe, zaobilazni ventil na pumpi šalje ulje nazad prema pumpi umjesto u karter, pogrešna viskoznost ulja ili produženi intervali mijenjanja ulja, visoka razina ulja, niska razina ulja, usisna strana pumpe propušta zrak. [6]



Slika 34. Oštećenje uzrokovano kavitacijskom erozijom [6]

6. ZAKLJUČAK

Prilikom uporabe ulja važno je izabrati odgovarajući tip ulja i održavati ga čistim, svježim i bez nazočnosti vlage. Ispravan izbor podrazumijeva pravilan odabir baznog ulja, mjesta namjene, ispravne viskoznosti i ispravnih aditiva za odgovarajuću namjenu.

Kontaminacija i degradacija ulja u eksploataciji se ne može potpuno spriječiti ali se mogu znatno usporiti, što je vrlo važno i za ulje i za strojne sustave. Brzina i stupanj degradacije ulja upravo su proporcionalni brzini i stupnju kontaminacije. Zbog toga je važno spriječiti brzu kontaminaciju ulja prije i tijekom uporabe. Spektar kontaminanata ulja dosta je širok, a svaki kontaminant utječe destruktivno na ulje, umanjujući mu fizikalno-kemijske i radne karakteristike, tako da su konačne posljedice skraćivanje radnog vijeka ulja i motora.

Ako se interval mijenjanja ulja produži iza vremena potrošenja aditiva, ne samo da ulje više neće vršiti svoju funkciju nego sami aditivi mogu postati štetna onečišćenja u ulju za podmazivanje. Kada se aditivi potpuno potroše, nakupljaju se i stvaraju naslage mulja i podižu viskoznost ulja za podmazivanje.

Pravilno održavanje ulja omogućuje maksimalnu produktivnost uz minimalne troškove. Pomoću pravovremenih analiza moguće je: ostvarivanje stalnog nadzora svih glavnih sustava stroja, otkrivanje problema u ranoj fazi te ustroj kompletne servisne povijesti stroja i ulja za njegovo podmazivanje. Najpouzdanije rezultate daju laboratorijske analize ulja odnosno SOS analiza ulja. Promjene stanja ulja tijekom uporabe zaključuju se iz nekoliko testova: količine taloga, razrjeđenje ulja gorivom, kemijske promjene u ulju nastale zbog korozije ili oksidacije, stupanj istrošenosti metalnih dijelova.

Temeljem laboratorijskih analiza utvrđuje se stupanj degradacije ulja i temeljem toga se donosi odluka da li je ulje za daljnju uporabu ili ga je potrebno promijeniti. Time se smanjuju kvarovi strojeva kao i troškovi popravljanja, a smanjeni su i troškovi nabave ulja i njegova odlaganja.

LITERATURA

[1] Pažanin, A.: *Brodski motori*, Školska knjiga, Zagreb, 1990.

[2] Martinović D.: *Brodski strojni sustavi*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2005.

[3] Komar, I.: *Sustavi motora*, Pomorski fakultet u Splitu, Split, 2012.

[4] Claude: *Oil service training*, Caterpillar, Malaga, 1998.

[5] *Lube handout*, Caterpillar, Malaga, 2001.

[6] *Engine bearings handout*, Caterpillar, Malaga, 2001.

[7] *Piston handout*, Caterpillar, Malaga, 2001.

[8] Radica, G.: *Dijagnostika brodskog 4T dizelskog motora*, Pomorski fakultet u Splitu, Split, 2008.

[9] Radica, G.: *Inteligentni brodski dvotaktni dizel motori*, Pomorski fakultet u Splitu, Split, 2011.

[10] Radica, G.; Račić, N.; Vrsalović, P.: *Dijagnostika kvarova sustava ulja brodskih motora*, Ukorak s vremenom, časopis Udruge pomorskih strojara Split, Split, (1332-136607), 46, 2012 , str. 44-52.

[11] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Tribologija] (22.8.2016)

[12] [http://www.marineinsight.com/main-engine/intelligent-cylinder-lubrication-for-modern-marine-engines-part-1/] (22.8.2016)

POPIS TABLICA

Tablica 1. API podjela ulja [5] 4
Tablica 2. Pojednostavljeni uzroci degradacije ulja i trošenja metalnih dijelova [5] 25
Tablica 3. Izvor potrošenih elemenata u motoru [4] 28

POPIS SLIKA

Slika 1. Indeks viskoznosti (VI) [5] 3
Slika 2. Aditivi poboljšivači viskoznosti [5] 9
Slika 3. Promjena kristalne strukture voska usljed korištenja aditiva [5] 9
Slika 4. Aditivi protiv pjenjenja kao silicijsko ulje [5] 10
Slika 5. Tipična polarna molekula [5] 11
Slika 6. Micele [5] 12
Slika 7. Odnos veličine aditiva i nečistoća naspram pojedinih vlakana filtera 12
Slika 8. Krivulja djelovanja ulja naspram vremena u radu [5] 13
Slika 9. Prikaz oksidiranih molekula i normalnih uljnih molekula [5] 14
Slika 10. Rad aditiva inhibitora korozije [5] 15
Slika 11. Aditivi protiv korozije [5] 16
Slika 12. Granični sloj podmazivanja [5] 17
Slika 13. Hidrodinamički sloj podmazivanja [5] 18
Slika 14. Prikaz hidrodinamičkog i elastohidrodinamičkog podmazivanja [5] 19
Slika 15. Prikaz alpha sustava podmazivanja [12] 23
Slika 16. Načini kontaminacije i posljedice na uljima za podmazivanje [4] 27
Slika 17. Erozija uzrokovana propuštanjem rasprskača goriva [7] 30
Slika 18. Diskoloracija uzrokovana nedovoljnim hlađenjem klipa [7] 31
Slika 19. Klip u procesu zaribavanja [7] 31
Slika 20. Prikaz erozije glave klipa koja rezultira zaribavanjem [7] 32
Slika 21. Adhezijsko trošenje kod hladnog starta [7] 32
Slika 22. Trošenje prstenova zbog loše kvalitete ulja [7] 33
Slika 23. Prikaz zamazane površine klipa i prstenova koji ukazuje na problem s uljem [7] ... 33
Slika 24. Nakupine ugljika u kanalima za kompresijske prstenove [7] 34
Slika 25. Abrazivno trošenje zbog naslaga ugljika na vrhu klipa [7] 34

Slika 26. Tipični znakovi rupičaste korozije [7] 35
Slika 27. Adhezijsko trošenje zbog niske dobave ulja [6] 35
Slika 28. Adhezijsko trošenje zbog loše kvalitete ulja za podmazivanje [6] 36
Slika 29. Adhezijsko trošenje do aluminijskog sloja [6] 36
Slika 30. Puknuće čeličnog kućišta ležaja zbog nedostatka podmazivanja [6] 37
Slika 31. Abrazivno istrošenje uzrokovano tvrdim česticama [6] 37
Slika 32. Tipično abrazivno oštećenje [6] 38
Slika 33. Ležajevi koji su zacrnjeni zbog prekomjernog udjela ugljika [6] 38
Slika 34. Oštećenje uzrokovano kavitacijskom erozijom [6] 39

POPIS KRATICA

VI (engl. *Viscosity index*) Indeks viskoznosti

SAE (engl. *Society of Automotive engineers*) Društvo automobilskih inženjera

API (engl. *American Petroleum Institute*) Američki institut za gorivo

VI (engl. *Viscosity improvers*) Poboljšivači viskoznosti

TBN (engl. *Total Base Number*) Ukupni bazni broj

SAN (engl. *Strong Acid Number*) Jaki kiselinski broj

SOS (engl. *Scheduled oil sampling*) Predviđeno uzorkovanje ulja za podmazivanje