

## FEROGRAFIJA U ODRŽAVANJU MOTORA I STROJEVA FERROGRAPHY IN ENGINE AND MACHINERY MAINTENANCE

UDK 621.892+621.436:629.12

Stručni rad

Professional paper

### Sažetak

U radu se opisuje metode analize mazivog ulja dizelskih motora i drugih brodskih strojeva u svrhu provjere stanja ulja kao i u svrhu provjere stanja pojedinih komponenti s konačnim ciljem da se postigne održavanje sustava prema stanju odnosno na temelju predviđanja.

### Summary

The paper deals with the analysis methods of diesel and other marine engines lubricating oil in order to examine the condition of oil and individual components as well. The final aim is to obtain the maintenance of the system following the condition, or on the basis of prediction.

## 1. Uvod

### Introduction

Ulja se susreću svuda u transportnim granama privrede i industriji, a posebno u metalnoj i prerađivačkoj industriji. Postoje ulja za podmazivanje, hidraulična ulja, termalna ulja za prijenos topline itd.

Sva ulja podložna su određenim promjenama svojstava dok se nalaze u fazi mirovanja, a naročito tijekom eksploatacije. Ulje u radu gubi svoju kvalitetu i postaje nečisto, odnosno stari. Promjene svojstava ulja posljedice su prije svega njihovog kemijskog sastava. Najveći utjecaj na promjenu kvalitete ulja za podmazivanje imaju prije svega: temperatura, tlak i brzina u sustavu za podmazivanje, prisutnost vlage i kisika iz zraka, produkti izgaranja, metalni sastojci, itd. Veliki utjecaj imaju još prašina i drugi oblici nečistoća, te djelovanje mikroorganizama.

Laboratorijske analize ulja postoje gotovo otkad i ulja za podmazivanje. Te su se analize činile kako bi

se ustanovilo stanje ulja, odnosno starost ili onečišćenost, s ciljem provodborne zamjene ulja kako bi se spriječila oštećenja dijelova strojeva prouzročena onečišćenjem ili degradacijom ulja.

Pravilo je u održavanju strojeva da je ulje "životna krv" stroja i da mora biti pažljivo održavano. Prvotno održavanje se svodilo na način da je dovoljno periodično mijenjati ulje u sustavu. Takav način održavanja sustava ulja prevladavao je godinama.

Današnje usredotočavanje na troškove u poslovanju svakog poduzeća, kao i na okoliš, sve više rezultira pritiscima na menadžere za primjenu metode održavanja i zamjene ulja prema stanju radije nego na temelju radnih sati, kalendarskog roka ili prema brojaču kilometara / milja.

Ako je ulje kontaminirano vodom ili mehaničkim nečistoćama, vrlo ga je lako pročitati raznim filtracijama ili centrifugiranjem i na taj način mu produžiti vijek trajanja i ponovno ga koristiti. Međutim, potrebno je imati na umu da pročišćavanje ulja svakako može produljiti radni vijek strojeva, ali nemože otkloniti uzroke kao što su abnormalno trošenje izazvano raznim mehaničkim problemima, na primjer ekscentricnost, zamor materijala i sl. Izmjene i pročišćavanja ulja mogu privremeno ublažiti problem, ali će zahvat održavanja za otklanjanje uzroka problema biti neizbježan.

Troškovi održavanja strojeva i opreme, maziva, itd. stalno se povećavaju. Doknadni dijelovi, radna snaga i zastoji, sve su skuplji i skuplji, pa zauzimaju sve značajnije mjesto u dobrom programu rukovođenja održavanjem. Tako i praćenje stanja stroja na temelju analiza ulja postaje sve važnije u programima održavanja.

Kao posljedica ovakvog razvoja održavanja, analize ulja za podmazivanje spadaju u dvije kategorije:

- analiza rabljenog ulja koja utvrđuje stanje ulja.
- ferografija ili analiza čestica trošenja koja utvrđuje stanje komponenata stroja / opreme.

\*Žarko Koboević, dipl. ing  
Upravitelj stroja

## 2. Analize ulja Oil analyses

Učinkovit i moderan program za održavanje na temelju predviđanja, koji se temelji na laboratorijskim analizama ulja, mora utvrditi stanje ulja ali i stanje stroja.

Kako je trošenje neizbježna i očekivana posljedica između pomičnih površina u međusobnom dodiru, ulje za podmazivanje može se koristiti kao dijagnostičirajući medij koji sadrži čestice trošenja s površina koje se troše. Tako praćenje čestica trošenja otkriva same čestice, ali ih i analizira, što može dati važne informacije o stanju unutarnjih dijelova stroja ili motora.

### 2.1. Praćenje stanja ulja Oil condition monitoring

Dio analize ulja koji se već duže vremena primjenjuje odnosi se na analiziranje stanja samog ulja, tj. odgovara li ulje po svojstvima za buduću uporabu. Kroz periodično uzimanje uzoraka ulja, laboratorij može ustanoviti efikasnost i preostali vijek trajanja ulja za podmazivanje i to na osnovi analiza koje pokazuju degradiranost i kontaminiranost ulja. Primjenjuje se nekoliko fizikalnih i kemijskih testova, obično uspoređujući rabljeno ulje s čistim i novim originalnim uljem.

Najčešće primjenjivani testovi za praćenje stanja ulja su:

#### 2.1.1. Viskozitet Viscosity

Viskozitet je sposobnost tekućine da se odupire pomicanju dvaju susjednih slojeva, odnosno protjecanju. To je jedno od najvažnijih svojstava maziva jer kontrolira uljni film koji se uspostavlja između kliznih površina. Uz osnovnu funkciju podmazivanja u sustavu, ulje ima i funkciju odvođenja topline, pa je viskozitet i tu važno svojstvo.

Složeni sustavi (kao npr. dizelski motori) zahtijevaju da se viskozitet stalno drži u propisanim granicama kako bi se osigurao pravilan protok do kritičnih dijelova sustava. Viskozitet motornih ulja tradicionalno se izražava u SAE skali, koja daje viskozitet pri temperaturi od 100°C. Sva ostala ulja za podmazivanje imaju definiran viskozitet u ISO skali pri temperaturi od 40°C. Obje skale imaju definiranu granicu viskoziteta kao što je prikazano u tablici 1.

Za mnoge vrste ulja u pomorskoj uporabi viskozitet je stabilan zbog strukture ugljikovodika u baznom ulju i obično se ne mijenja prilikom normalne uporabe, ukoliko se ulje ne kontaminira iz vanjskih izvora.

Tablica 1. Viskoziteti ulja prema SAE i ISO standardima

Table 1. Oil viscosity following SAE and ISO standards

SAE SKALA	VISKOZITET (cSt) pri 100°C		ISO SKALA	VISKOZITET (cSt) pri 40 st.C	
	MIN	MAX		MIN	MAX
20	5,6	9,3	15	13,5	16,5
30	9,3	12,5	22	19,8	24,2
40	12,5	16,3	32	28,8	35,2
50	16,3	21,9	46	41,4	50,6
60	21,9	26,1	68	61,2	74,8
			100	90,0	110,0
			150	135,0	165,0
			220	198,0	242,0
			320	288,0	352,0
			460	414,0	506,0
			680	612,0	748,0

Opadanje viskoziteta sistemskog (karterskog) ulja za podmazivanje kod dizelskih motora najčešće je rezultat miješanja ulja s tekućinom nižeg viskoziteta, kao što su druga maziva ili gorivo. Za druge vrste ulja uobičajeni razlozi opadanja viskoziteta tijekom uporabe je kontaminiranje iz vanjskih izvora ili degradiranje ulja putem oksidacije. Nasuprot ovome, viskozitet se može povećati zbog: oksidacije, netopivih čestica, vode (emulziranje), kontaminacija s tekućinom većeg viskoziteta, isparavanjem frakcije nižeg vrelišta.

#### 2.1.2. Sadržaj vode Contained water

Voda se često nalazi kao kontaminirajuće sredstvo u uljima za podmazivanje na brodovima. Može dospjeti u sustave ulja na razne načine uključujući tu i kondenzaciju u tankovima, popuštanje rashladnika ulja hlađenih vodom, curenje mimo brtvenice propelerne osovine, popuštanje oplate tankova, probijanje linije odvajanja vode u centrifugalnim separatorima. Voda može biti slana i odvojena, ili u obliku emulzije. Posljedice rada strojeva s uljem kontaminiranim vodom mogu biti brojne. Svakako, zbog morske vode može biti znatno povećana opasnost od korozije čeličnih površina, opasnost od trošenja kliznih površina, zatim opasnost od mikrobakterijske infekcije. Za većinu uređaja sadržaj vode u ulju ne bi smio biti veći od 0,25 %, a za turbinska ulja za podmazivanje i kontrolna ulja ne više od 100 ppm.

Postoji nekoliko metoda koje se koriste za testiranje uzorka ulja na sadržaj vode, a svaka ima različitu razinu osjetljivosti. Najznačajnije metode su prikazane u tablici 2.



**Tablica 2. Metode analize sadržaja vode u ulju**  
**Table 2. Analysis methods of contained water in an oil**

TEST	GRANICA DETEKCije	TROŠAK TESTA	PREDNOSTI	MANE
CRACKLE (pucketanje)	1000 ppm (0,1%)	mali	dobar indikator lako se izvodi	nije pogodan za procjene trendova
CENTRIFUGALNI	1000 ppm (0,1%)	mali	široka primjena, koristi se i za testiranje goriva	u novije vrijeme nije baš efektivan zbog aditiva u ulju za demulziranje
FT-IR (Fourier Transform Infra Red)	1000 ppm (0,1%)	mali	kvantitativni pogodan za procjenu trendova lako se izvodi	prisutnost drugih tekućina (glikol) može dovesti u zabludu spektrometar
KARL FISHER	10 ppm (0,001%)	visok	najbolji za male sadržaje vlage, vrlo precizan, tražen za turbinske i transformatorske sustave	aditivi u uljima mogu uzrokovati smetnje, potrebno laboratorijsko iskustvo za pravilno izvođenje testa.

Vodom kontaminirano ulje za podmazivanje može se uspješno tretirati taloženjem ili kombinacijom taloženja i separiranja u centrifugalnim separatorima. Ako je voda previše jako emulgirala u ulju, separiranje može biti teško ili ponekad nemoguće. Ako se ovako što dogodi, jedino praktično rješenje je da se izmijeni cjelokupni sadržaj ulja u stroju.

Druga opasna posljedica vode u ulju je povećanje viskoziteta maziva što rezultira smanjenim protokom u sustavima s podmazivanjem pod tlakom i na taj način mora prouzročiti ozbiljne posljedice u funkcijama podmazivanja i hlađenja vitalnih komponenti stroja.

**2.1.3. Plamište**  
**Flash point**

Testiranje plamišta izvodi se na uljima za podmazivanje gdje postoji rizik od prodora medija niskog plamišta u sustav ili kod sustava gdje postoje termička naprezanja. Smanjena točka plamišta u ulju za podmazivanje povećava rizik od požara ili eksplozije.

Sustavi za podmazivanje uljem iz kartera kod dizelskih motora su podložni onečišćenju gorivom za vrijeme normalnog rada. Ovakvo onečišćenje kod klipnih dizelskih motora može se pojaviti zbog propuštanja visokotlačnih pumpi goriva i zbog neizgorenog goriva koje prodire između cilindarske košuljice i klipnih prstenova u karter. Osim povećanog rizika od zapaljenja/eksplozije postoji i rizik od kvara zbog manjkavog podmazivanja.

**2.1.4. TBN (Total Base Number)**  
**TBN (Total Base Number)**

TBN je općenito prihvaćen kao indikator sposobnosti ulja za podmazivanje da neutralizira štetne kisele produkte izgaranja motora, koji se najčešće razvijaju zbog oksidacije sumpora. Bez dovoljne rezerve lužnatosti u ulju mnoge su površine u motoru izložene korozivnom djelovanju sumporne kiseline.

Dizelski motori s klipovima zahtijevaju ulje s većim TBN, zbog toga što je ulje iz kartera u izravnom kontaktu s kiselim produktima izgaranja, za razliku od motora sa stapovima i križnim glavama, gdje je prostor kartera odvojen od prostora izgaranja pa se time i ulje manje onečišćuje produktima izgaranja.

**2.1.5. TAN (Total Acid Number)**  
**TAN (Total Acid Number)**

TAN se koristi kao pokazatelj za oksidacijske promjene i degradiranje ulja u uporabi. Promjene u ulju se prepoznaju kada TAN dostigne razinu unaprijed utvrđenu za određeno ulje i određenu primjenu. Iznenadan porast TAN-a može biti indikacija nenormalnih radnih uvjeta (kao što je pregrijavanje) koji zahtijevaju istraživanje. Mnogi proizvođači za određena ulja navode maksimalno dopuštene granice TAN.

**2.1.6. Netopive tvari**  
**Insoluble matters**

Za karterska ulja dizelskih motora test neotopivih tvari daje indikaciju stupnja onečišćenosti ulja s česticama produkata izgaranja i drugim neotopivim česticama. Postoje mnoge metode za mjerenje neotopivih tvari u ulju, a mnoge počivaju na tehnikama centrifugiranja ili filtriranja.

Kod klipnih dizelskih motora, koji rade bez centrifugalnog čišćenja ulja, sadržaj netopivih čestica ima tendenciju progresivnog porasta s vremenom. Taj porast najviše ovisi o potrošku ulja i o koksiranim česticama ulja koje nastaju zbog propuštanja plinova izgaranja mimo klipnih prstenova. Za ovakve motore neophodno je periodično mijenjati ulje kako bi se sadržaj neotopivih čestica držao u dopuštenim granicama.

Za obje vrste dizelskih motora, stapnih s križnom glavom i klipnih, koji su predviđeni da rade s kontinuiranim tretmanom ulja za podmazivanje centrifugiranjem, uobičajeni trend porasta neotopivih čestica dopušten je samo do granice ravnoteže. Ta granica ravnoteže je tamo gdje je količina čestica koje se stvaraju jednaka količini čestica koje se izdvajaju putem centrifugiranja, filtriranja i samim potroškom ulja koje prolazi mimo prstenove u prostor izgaranja. Za motore s križnom glavom granica je znatno niža jer se ulje manje onečišćuje zbog odvojenosti prostora izgaranja od kartera.

## 2.2. Praćenje stanja motora analizom ulja *Engine condition motoring by means of oil analysis*

Praćenje stanja motora putem analize ulja dokazana je i isplativa tehnika u upravljanju održavanjem. Napredak u razvoju računala i tehnologije učinio je moderne analize ulja izvodljivima i vrlo korisnima, višestruko vraćajući uložena sredstva.

Najčešće čestice u ulju su čestice normalnog trošenja koje nastaju normalnim trenjem između kliznih površina koje se podmazuju. Kad sustav radi normalno stvaranje čestica normalnog trošenja je količinski konstantno. Ove čestice su najčešće pločastog oblika i veličine 5-10 mikrometara. Kad se u sustavu pojavi stanje nenormalnog trošenja količina čestica se primjetno povećava, a i same čestice su obično dimenzija većih od 10 mikrometara.

Analizirajući čestice trošenja, brojnost, veličinu, sastav i oblik, može se unaprijed predvidjeti nastajanje problema ili oštećenja i pravodobno poduzeti zahvat održavanja.

Kod brodskih srednjehodnih motora jedan od najvažnijih indikatora trošenja su čestice željeza koje su rezultat korozivnih i abrazivnih procesa trošenja košuljice i prstenova.

Količina željeznih čestica koje nastaju varira ovisno o vanjskim faktorima odnosno o kvaliteti goriva (sadržaj sumpora i abrazivnih čestica u gorivu).

Količina čestica koje se izdvajaju iz ulja također može varirati ovisno o performansama uređaja za čišćenje ulja kao što su filtri i separatori.

Ovo znači da u ovakvom sustavu količina čestica trošenja ovisi o ravnoteži nastanka i izdvajanja čestica i da u danom trenu može imati pad ili porast.

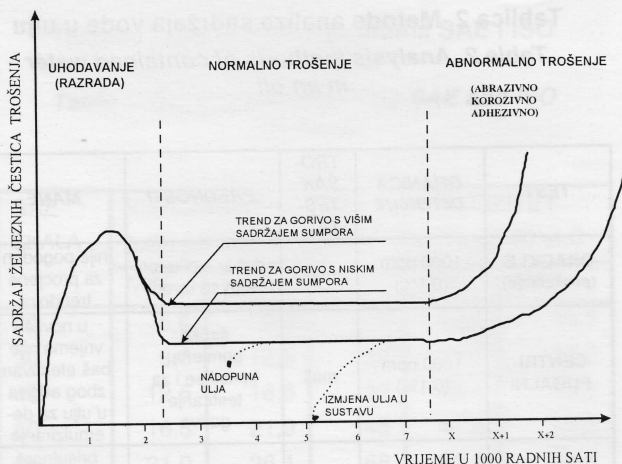
Drugi faktori koje treba razmotriti kod ovakvih sustava su:

- efekt dodavanja novog i čistog ulja u sustav,
- je li uzorak ulja reprezentativan za cijeli sustav,
- je li sustav ulja bio u uravnoteženom radnom stanju prilikom uzimanja uzorka ulja za analizu.

Sustav ulja može biti u neuravnoteženom stanju ako je uzorak ulja uzet neposredno odmah nakon starta motora. U tom slučaju će biti u uzorku ulja manje metalnih čestica nego je to stvarno.

Za brodske je motore neuravnoteženo stanje i za vrijeme teškog i uzburkanog mora kad se povećava koncentracija metalnih čestica u ulju zbog podizanja istaloženih čestica s dna tanka i miješanja sadržaja tanka.

Na slici 1. prikazano je općenito kako sadržaj čestica željeza može varirati kod srednjehodnih brodskih dizelskih motora. Budući da sadržaj sumpora u gorivu kod normalnih komercijalnih goriva varira, to za posljedicu ima i različit sadržaj čestica željeza kod normalnog trošenja.

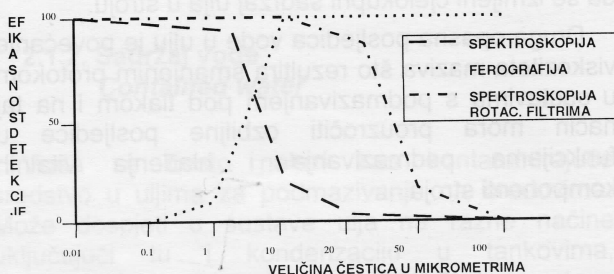


Slika 1. Krivulja sadržaja željeznih čestica u ulju srednjehodnog dizelskog motora

Figure 1. The curve of iron particles in the oil of medium speed diesel engine

Različiti se testovi koriste u analizama čestica trošenja u uljima. Jedni se odnose na otkrivanje količine čestica, a drugi na analizu samih čestica. Tako se susreću testovi spektroskopije atomske emisije, spektroskopije atomske apsorpcije, ferografije, magnetski čepovi, ispitivanje čestica trošenja u filtrima, infracrvena analiza itd.

Svakako najčešće korišteni testovi za praćenje stanja stroja su: ferografija, spektroskopija i spektroskopija rotacijskim filtrom.



Slika 2. Efikasnost detekcije čestica trošenja pojedinim metodama

Figure 2. Efficiency of particles wear detection by various methods

## 3. Ferografija *Ferography*

Ferografija je jedna od metoda analize metalnih čestica u uljima. Naziv dolazi od latinske riječi "ferrum" što znači željezo. To je tehnika odvajanja čestica trošenja iz tekućina za mikroskopsko ispitivanje i analizu.



Razvijena je 70-ih godina u suradnji s vojnim službama, stalno se razvijala i napredovala. Razvoj znanja o pojavi čestica istrošenja bio je potpomognut razvojem ferografskih instrumenata i uređaja. Ovi uređaji su omogućili šire izučavanje i klasifikaciju čestica istrošenja nastalih od različitih materijala i metala, magnetskih i nemagnetskih. Ferografska analiza određuje porijeklo, karakteristike i raspored čestica trošenja u ulju za podmazivanje, hidrauličnim uljima i mastima.

Uzorak ulja uzima se s pažljivo odabranog mjesta prije filtra kako bi se osigurala reprezentativna koncentracija čestica trošenja. Ferografija se zatim primjenjuje na magnetski odvojene čestice. Mikroskopskim ispitivanjem ovih čestica može se utvrditi uzrok trošenja. Dakle, ferografskom metodom utvrđuje se stanje komponenti stroja bez rastavljanja stroja radi pregleda i inspekcije.

Prednosti ferografije su: *Osjetljivost u širokom rasponu veličina čestica trošenja* - osjetljivost instrumenata ferografije da otkrivaju čestice veličine od 1 do 250 mikrometara.

- *Razdvaja čestice po veličini* - ferogram jasno razlikuje i odvaja čestice trošenja po veličini; mikroskopski pregled ovih ferograma ukazuje na probleme stroja koje druge metode ne mogu otkriti.

- *Identificira legure čestica trošenja* - ferografskim pregledom moguće je identificirati različite legure u česticama trošenja, kako željezne tako i drugih metala. (Spektroskopija identificira samo elemente.)

- *Identificira izvore trošenja* - Ferografske procedure omogućuju identifikaciju komponente koja se abnormalno troši.

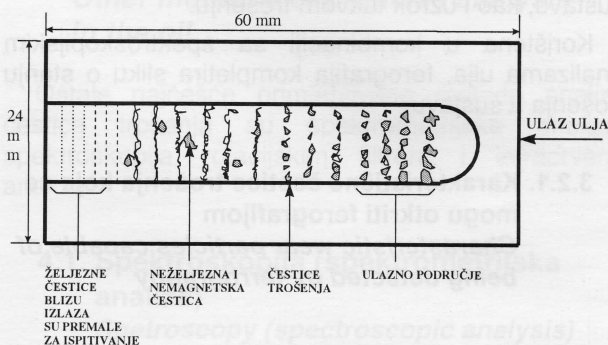
Ferografska analiza čestica trošenja je proces u dvije etape, tj. dvije ferografske tehnike: *ferografija izravnim očitavanjem* (Direct Reading Ferrography) i *analitička ferografija* (Analytical Ferrography).

### 3.1. Ferografija izravnim očitavanjem *Direct Reading Ferrography*

Ferografija direktnim očitavanjem (Direct Reading Ferrography - DR-Ferr) daje izravne izmjere količine čestica trošenja prisutnih u uzorku ulja. Ferograf izravnog očitavanja je mikroprocesorsko/optički instrument koji mjeri veličinu čestica trošenja u uzorku ulja. Čestice trošenja su podijeljene u dvije kategorije. Velike čestice (DL) koje su veće od 15 mikrometara i predstavljaju čestice abnormalnog trošenja, te male čestice (DS) koje su manje od 15 mikrometara, i predstavljaju čestice normalnog trošenja.

Uzorak ulja se provodi kroz taložnu cijev koja leži u magnetskom polju. Veće čestice u ulju bivaju jače privučene i talože se na ulazu u taložnu cijev, a manje čestice, koje magnetsko polje slabije privlači, talože se proporcijalno njihovoj veličini uzduž taložne cijevi. Nemagnetske čestice kao što su aluminij, mjed i bijeli metal veličinom su manje selektivne.

Veće čestice nemagnetskih metala mogu se pronaći svugdje uzduž cijevi, kao što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Taložna cijev  
Figure 2. Sediment tube

Mjereći intenzitet prolaza svjetla kroz taložnu cijev, koristeći optička vlakna, ustanovi se količina malih i velikih čestica trošenja. Omjer između očitane sadržaja velikih (DL) i malih (DS) čestica, otkriva tijekom vremena promjene u načinu trošenja sustava.

Na primjer: tendencija povećanja broja velikih čestica trošenja pokazuje da se sustav (motor) nalazi u radnom stanju s abnormalnim trošenjem. Tendencija povećanja broja malih čestica trošenja može ukazati na povećanje korozije u sustavu (veličina čestica trošenja zbog korozije je manja od 3 mikrometra).

Izravnim očitavanjem rezultata ferografije ustanovljava se stanje trošenja u sustavu podmazivanom uljem. Kad se abnormalno trošenje otkrije, za detaljnu analizu koristi se analitička ferografija.

### 3.2. Analitička ferografija *Analytical Ferrography*

Analitička ferografija omogućava vizualno ispitivanje čestica istrošenja prisutnih u uzorku ulja. Za stvaranje ferograma koristi se razrijeđeni uzorak ulja koji prolazi preko staklenog klizača ispod kojeg je magnetsko polje. Magnetsko polje privlači željezne čestice izvan ulja na površinu klizača. Željezne se čestice uzduž ferograma poredaju u redu od većih prema manjima. Neželjezne čestice (kao što su bakrene) mogu se lako razlikovati jer se raspoređuju svuda po ferogramu.

Ferogram sadrži "blich-snimak" čestica trošenja prisutnih u sustavu u trenutku kad je uzorak ulja bio uzet. Koristeći bikromatski mikroskop pri povećanju od 100, 500 ili 800 puta, pod izravnim i reflektirajućim svjetlom, operator analize prepoznaje i klasificira čestice u skladu s njihovim svojstvima (veličini, obliku, boji, površinskim izgledom, magnetizmom itd.).

Obučeni i iskusni operator analize može razlikovati čestice nastale abrazivnim djelovanjem od

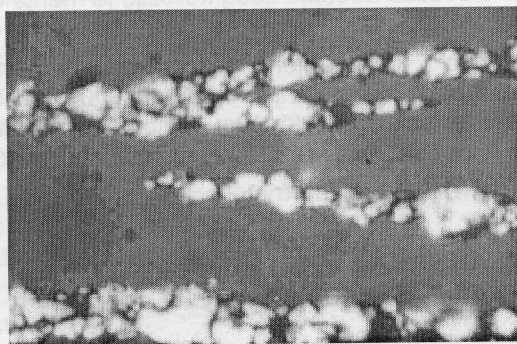
čestica nastalih kad se površine kotrljaju jedna po drugoj (kao što su kotrljajući dijelovi kotrljajućih ležajeva) i tako otkriti vrstu trošenja nastalog u sustavu, kao i uzrok takvom trošenju.

Korištena u kombinaciji sa spektroskopijskim analizama ulja, ferografija kompletira sliku o stanju trošenja u sustavu.

**3.2.1. Karakteristične čestice trošenja koje se mogu otkriti ferografijom**  
*Charasteristic wear particles capable of being detected by ferrography*

Postoji nekoliko karakterističnih tipova trošenja koja se mogu otkriti analitičkom ferografijom, što omogućuje ključna saznanja o normalnom i abnormalnom trošenju stroja ili motora. Šest najčešćih vrsta čestica uključuju sljedeće:

- **Normalne čestice trošenja struganjem** pojavljuju se stalno, sa sporim i stabilnim ritmom, kao posljedica normalnog rada motora. Takve čestice su obično male, pločastog oblika, veličine 5-10 mikrometara i debljine 1 mikrometar ili manje. Imaju vrlo malu ili nevidljivu površinsku hrapavost. Kako radni parametri motora postaju teži, tako metalne čestice bivaju većih dimenzija i oksidiraju. Konačno, neposredno prije kvara, stvaraju se velike metalne čestice kao posljedica jakog trošenja.



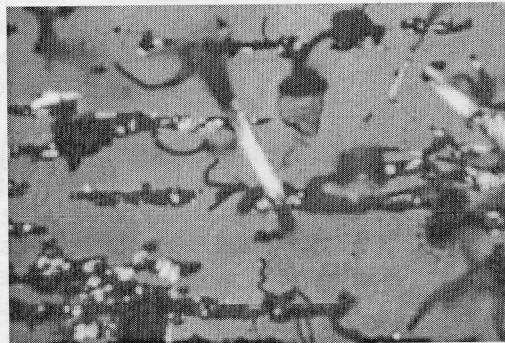
**Slika 3. Primjer čestica trošenja struganjem**  
*Figure 3. Particles pattern of wear by seraping*

- **Rezne ili abrazivne čestice trošenja** rezultat su prodiranja jedne površine u drugu. Ovakve čestice imaju oblik tankih do debelih kovrčavih strugotina, željeznih i neželjeznih materijala. Nastaju na dva načina.

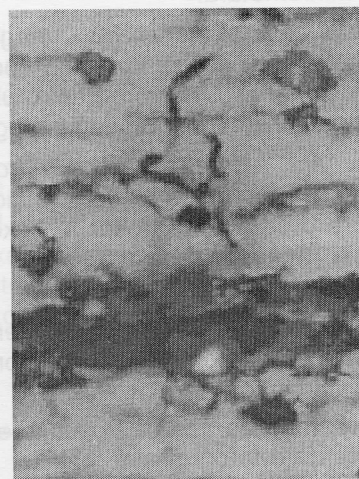
Prvi je kad tvrda komponenta postane ekscentrična ili napukne, pa tvrdim i oštrim krajem prodire u mekšu površinu. Tada nastaju grube i velike čestice trošenja, prosječno 2-10 mikrometara široke i 25-100 mikrometara duge.

Drugi je kad se abrazivne čestice iz kontaminiranog ulja utisnu u meku kliznu površinu olovne ili kositrene legure ležajeva. One tad strše iz meke površine i zadiru u suprotnu kliznu površinu, što stvara vrlo fine čestice, žičanog oblika, debljine

oko 0,25 mikrometara . Bilo koji znak reznog ili abrazivnog trošenja ukazuje na abnormalnu situaciju. Čestice veće širine i dužine su i indicacija ozbiljnijeg kvara ili poremećaja u motoru.



**Slika 4. Primjer rezne čestice trošenja**  
*Figure 4. Pattern of cutting particle wear*



**Slika 5. Rezne i abrazivne čestice trošenja pod povećanjem od 500 puta**  
*Figure 5. Cutting and abrasive particles of wear magnified 500 times*

- **Sferne čestice trošenja** nastaju zbog zamora materijala ležaja. Zamor materijala kotrljajućih ležaja nije jedini izvor sfernih metalnih čestica. Zavarivanje, brušenje ili pjeskarenje stvaraju ih također. Samo malobrojne sferne čestice kotrljajućih ležajeva su promjera većeg od 15 mikrometara, dok su čestice od zavarivanja, pjeskaranja i brušenja promjera većeg od 20 mikrometara. Sferne čestice, prouzročene nekim vanjskim procesom najčešće su krupne, grube i oksidirane.

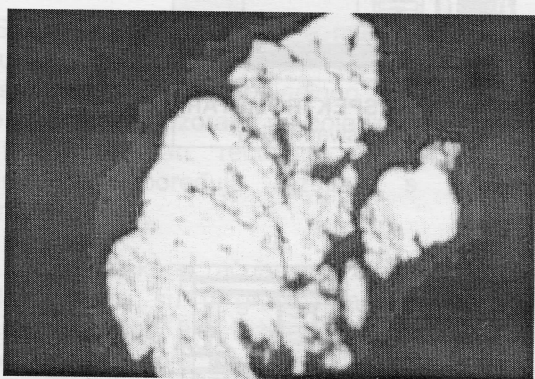
- **Čestice trošenja teškog klizanja** su pokazatelj prekomjernog opterećenja na površinama u kontaktu. Ove čestice su duge i plitke, a njihove klizne istrugane pruge čine ih lako prepoznatljivima. Veličina čestica je veća od 30 mikrometara i ponekad se pojavljuju miješanih boja zbog ekstremne temperature i tlaka koji su u svezi s njihovim nastajanjem.





Slika 6. Čestica trošenja teškog klizanja  
Figure 6. Wear particle of heavy sliding

- **Lamelaste čestice trošenja** nastaju prolaskom čestica trošenja između površina kotrljajućih elemenata. Mogu nastati zbog zamora materijala, prekomjernog opterećenja, nedovoljnog podmazivanja ili kontaminiranosti ulja. Čestice se spljošte, krajevi im se odvoje i napuknu, te formiraju rupu u materijalu. Veličina čestica može varirati između 15 i 500 mikrometara. Ležaj redovito stvara pločaste čestice tijekom radnog vijeka, ali zbog zamora materijala ova se pojava povećava. Povećanje količine lamelastih čestica u dodatku sa sferičnim česticama ukazuje na zamor materijala kotrljajućeg ležaja.



Slika 7. Lamelasta čestica  
Figure 7. Plate particle

- **Čestica trošenja zupčanika** imaju dva primarna mehanizma nastajanja, povezana sa struganjem i zamorom materijala na dodirnoj površini zuba. Ove čestice su slične onima koje se pojavljuju zbog zamora materijala kotrljajućih ležaja. Obično imaju plosnatu površinu i nepravilan oblik. Rezultat su naprezanja na površini zuba koja uzrokuju puknuća koja se šire dublje u zub zupčanika prije odlomljavanja čestice. Ove čestice naginju hrapavoj površini i rogatim krajevima. Neke od većih čestica imaju pruge na njihovim površinama, otkrivajući tako klizni kontakt.

#### 4. Ostale metode analize čestica u ulju *Other methods of particles analysis in the oil*

Ostale najčešće primjenjivane metode analize čestica trošenja su spektrometrijska analiza, spektroskopija rotacijskim filtrom i infracrvena analiza.

##### 4.1. Spektroskopija (spektrometrijska analiza) *Spectroscopy (spectroscopic analysis)*

Najraširenija je tehnika za praćenje čestica istrošenja. Daje kvantitativnu i kvalitativnu identifikaciju, kao i analizu počela elemenata **finih** čestica trošenja u uzorku ulja. Bilježi koncentracije više od 20 elemenata u milijuntim dijelovima (PPM).

Otkriva metale kao što su: aluminij, krom, bakar, kositar, olovo, srebro, titan, nikal, zatim uljne aditive poput kalcija, barija, cinka, fosfora, magnezija, molibdena itd. Otkriva rutinski i kontaminirajuće elemente npr: silicij.

Najveće je ograničenje ove metode slaba uspješnost u otkrivanju čestica većih od 5 mikrometara.

Ima nekoliko tipova spektrometara koji se koriste u ovu svrhu, a mogu se podijeliti u dvije kategorije: one atomske apsorpcije i one atomske emisije.

##### 4.2. Spektroskopija rotacijskim filtrom *Rotate Filter Spectroscopy*

RFS (Rotode Filter Spectroscopy) novija je spektroskopijska tehnika, prvi put uvedena 1992. godine, a otkriva **grublje i veće** metalne i kontaminirajuće čestice (obično 12 elemenata) koje druge konvencionalne tehnike mogu propustiti. Uspješnost otkrivanja većih čestica sve je slabija što je promjer čestice veći od 25 mikrometara.

Ova je metoda razvijena radi unaprjeđenja spektroskopijske metode analiziranja ulja u svrhu praćenja stanja strojeva i predviđanja održavanja, bez ograničenja malom veličinom čestica prijašnje kombinacije spektrometrijskih i ferografskih tehnika. RFS se koristi kao drugi test koji kvantitativno i kvalitativno prepoznaje veće željezne i neželjezne čestice, te kontaminirajuće čestice. Test koji je relativno brz prepoznaje čestice onih veličina gdje spektroskopija atomske emisije gubi učinkovitost.

##### 4.3. Infracrvena analiza *Infrared analysis*

Infracrvena analiza je spektrometrijska tehnika za otkrivanje **organskih kontaminanta, vode ili produkata degradiranja** u uzorku ulja. Za vrijeme radnog vijeka maziva produkti oksidacije se

akumuliraju i uzrokuju degradaciju ulja, koje u mnogim slučajevima postaje lagano kiselo. Ako oksidacija postane jača, ulje će prouzročiti koroziju kritičnih površina u motoru ili stroju. Veći "oksidacijski broj" znači više prisutnih oksida.

Infracrvena spektroskopija također otkriva sadržaj vode, antifrizna, naslaga čađe i čvrstih produkata izgaranja, razrjeđenje gorivom, degradacijske spojeve na bazi nitrida, oksida i sulfata. Zapečenost prstenova, stvaranje taloga, začepljenje filtra, posljedica su oksidacijskog procesa.

Rezultati ove analize su bitni za praćenje trenda ulja.

#### 4.4. Mikroskopski test *Mikroscopic test*

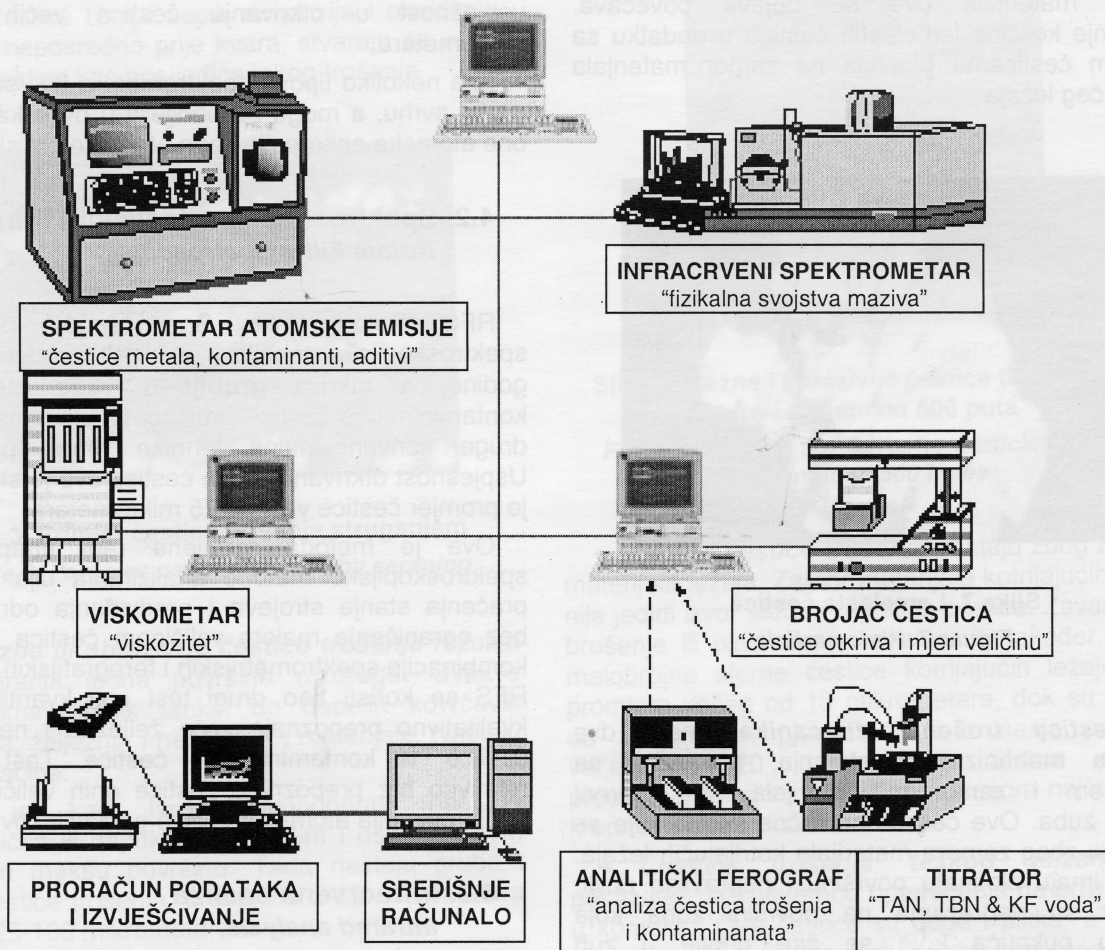
Ovo je test koji se koristi kad spektrometrijske metode otkriju neželjne čestice ili kontaminaciju, ili pak kad ne mogu otkriti neželjne čestice. Ulje se propušta kroz filtarsku membranu da se dobiju uzorci za promatranje mikroskopom. Ovakvi se testovi koriste samo kao izuzetak.

### 5. Laboratoriji analize uzoraka ulja *Laboratories of oil sample analysis*

Jedan od "full service" laboratorija prikazan je na slici 8. Osnovne komponente su: emisijski spektrometar, infracrveni spektrometar (FT-IR) i viskometar. Svaki instrument šalje svoje rezultate u temeljni laboratorijski sustav upravljanja, kako bi se ti rezultati spremili, obradili i raportirali, odnosno o njima izvjestili korisnici tih podataka.

*Spektrometar atomske emisije* temeljni je instrument za rutinska mjerenja koncentracije čestica metala, čestica aditiva i kontaminirajućih čestica. On omogućava jednostavnost operacija, osjetljivost i na veće čestice, razrjeđivanje ili omekšavanje uzoraka, i ne zahtijeva hlađenje. Analizu za otprilike 20 elemenata izrađuje u vremenu kraćem od minute.

*Spektrometar atomske apsorpcije* se rijetko upotrebljava, osim kad je volumen uzorka ekstremno mali i kad trošak analize po uzorku nije naručitelju toliko važan.



Slika 8. Laboratorij analize čestica u ulju s kompletnom uslugom  
Figure 8. Laboratory of oil particles analysis with complete service



*Infracrveni spektrometar* radi s programima za otkrivanje elemenata degradacije i kontaminacije ulja, mjereći spektar svjetla uzorka ulja. Ova tehnika je brza, manje od minute po uzorku, i daje podatke o oksidima, nitratima, sulfatima, razrjeđenosti gorivom, produktima izgaranja, vodi itd. Kao brza tehnika postala je standardni instrument u mnogim laboratorijima koji obrađuju veliki broj uzoraka.

*Viskometar* je treći potrebni instrument u osnovnom laboratoriju. Viskozitet je najvažnija fizikalna karakteristika maziva o kojoj ovisi sposobnost podnošenja opterećenja ulja karakteristike protjecanja i karakteristike provođenja topline. Ručni viskometri nisu skupi i rade zadovoljavajuće za mali broj uzoraka za analiziranje.

*Automatski titrator* je sastavni dio kompletno opremljenog laboratorija kad se traži više informacija nego što su to informacije priskrbljene infracrvenim spektrometrom. Ovaj instrument otkriva TAN, TBN, i sadržaj vode po Karlu Fisheru.

*Brojač čestica* je za preporučiti kad je u pitanju analiza uzoraka ulja hidrauličkih sustava ili drugih čistih sustava kao što su turbinski i kompresorski sustav.

*Analitički ferograf* magnetski odvaja čestice iz uzorka ulja i slaže ih po veličini za mikroskopsku analizu. Daje važne dodatne informacije o metalnim česticama prevelikim da bi se analizirale rutinskim spektrometrijskim metodama.

Svi instrumenti šalju svoje mjerenje u središnje računalo, gdje se rezultati uklapaju u povijest ("history file") svakog pojedinog motora, stroja ili mjesta uzimanja uzoraka na pojedinom motoru. Kad je test kompletan, računalo poziva "file" svake jedinice i uspoređuje rezultate s dopuštenim granicama.

U automatskom računanju zapisi za uzorke s podacima koji su u granicama normale prolaze izravno u "history file" i izvješće se, bez preporuka, šalje osoblju koje obavlja održavanje. Rezultati analiza uzoraka ulja rezultate izvan dopuštenih granica upućuju na pregled laboratorijskih eksperata, koji tada šalju izvješće osoblju održavanja s preporukama za određeni zahvat održavanja.

Uz ovu opremu laboratoriji za analizu ulja sadrže i specifične računalne programe za analizu ulja, s ciklusom od 24 - 48 sati, pomoću kojih se dobiju podaci i trendovi, potrebni za praćenje stanja strojeva.

Budući da program analize ulja kreira izvješća temeljena na uzorcima ulja, vrlo je važno pažljivo i učestalo uzimanje uzoraka. Jedan nepravilno uzet ili kontaminirani uzorak ulja rezultira nepotpunim ili pogrešnim podacima. Uzimanjem uzoraka nedovoljno često može se ne uočiti nastajanje početka problema, a prečesto uzimanje uzoraka ima za posljedicu povećanje operacijskih troškova.

## 6. Kontrola ulja u pomorstvu *Lubrican monitoring in ship*

Zbog velikih i skupih motora na brodovima, te zbog velikih količina ulja u sustavima za podmazivanje tih motora, na brodovima se posebna pažnja posvećuje uljima. Zato se već pri projektiranju broda mora predvidjeti budući tretman i obrada ulja za podmazivanje; tako postoje taložni tankovi rabljenog ulja i mnogobrojni filtri ulja u raznim sustavima i centrifugalni separatori za separiranje ulja za podmazivanje porivnog dizelskog motora i dizelskih motora koji pogone električne generatore.

Svaki brod ima nekakav plan i program za održavanje broda. U tim programima nalaze se i intervali za kontrolu ulja za podmazivanje, hidrauličkih ulja, reduktorskih ulja i svih ostalih ulja. Postoje dva načina kontrole ulja koja se primjenju na brodovima:

1. jednostavnim metodama koje se izvršavaju na brodu, a koje daju samo rezultate o stanju ulja.
2. uzimanjem uzoraka i slanjem na analizu u laboratorije proizvođača ulja gdje se dobivaju rezultati o stanju ulja i o stanju motora.

*Jednostavne metode* se obavljaju na brodu uglavnom pomoću malih kompleta u kojima se nalaze razne posude, jednostavni alati i kemikalije koje reagiraju na pojedine sastojke iz ulja. Najčešće se kontroliraju viskozitet ulja, sadržaj vode u ulju, sadržaj natrij-klorida; ako je riječ o slanoj vodi, specifična težina, krutište/stinište i kompatibilnost.

### 6.1. Osvrt na Shell-ove i BP-ove brze kontrole ulja u pomorstvu *On "Shell" and "BP" rapid lubricant analysis*

Gotovo svi proizvođači ulja za primjenu u pomorstvu imaju i organiziran sustav kontrole i analize tih ulja. Tako *British Petrol* (BP) ima sustav "Enercare", dok *Shell* ima svoj sustav "Rapid Lubricant Analysis".

Tijek procesa analize počinje uzimanjem uzorka ulja u za to namijenjenu plastičnu bočicu (Shell - 50 ml, BP - 100 ml).

Na bočici se pričvrsti ispunjena naljepnica s podacima o ulju, stroju, radnim satima ulja itd., te se sve spakira u posebno pakovanje i pošalje avionskom poštom do najbližeg laboratorija proizvođača ulja.

U laboratoriju se analizira uzorak, rezultati se unesu u bazu podataka sustava (Enercare ili Rapid Lubricant Analysis), zatim se zajedno s rezultatima 5 prošlih kontrola (povijesni pregled) šalju specijalistu za praćenje stanja stroja i periodičko održavanje, nakon čega on izvješće nadopunjuje preporukama i savjetima.

Pri normalnim okolnostima takvo izvješće se šalje na određenu odgovornu osobu u poduzeću (najčešće inspektor broda brodarske kompanije) nakon čega ona to izvješće prosljeđuje na brod upravitelju stroja. U slučaju iznimnih okolnosti izvješće se izravno pošalje na brod. Čitav ovaj ciklus traje najduže 72 sata.

## 7. Zaključak Conclusion

Prvi je cilj programa održavanja predviđanjem, koji se temelji na praćenju stanja putem analize ulja i na ferografiji, identificirati potencijalne kvarove u njihovim ranim stadijima kad se popravci još uvijek mogu izvršiti navrijeme i tako izbjeći skupa povratna oštećenja. Drugi cilj je praćenje kvalitete ulja i reduciranje potrošnje ulja kroz produljenje intervala izmjene ulja.

Konkretni je dobitak reduciranje troškova održavanja, povećavanje raspoloživosti i vijeka trajanja opreme, reduciranje potrošnje ulja i unaprjeđenje sigurnosti. Ovo se može ukratko prikazati kako slijedi:

*Reduciranje troškova održavanja* - ovo je bjelodana korist, ali ponekad je vrlo teško dokumentirati. Kroz analizu ulja mogu se izbjeći sljedeći problemi:

- Potpuni zastoj stroja. Ozbiljni mehanički kvar može rezultirati velikim oštećenjem motora. Očit primjer je oštećenje glavnog ležaja turbine i sl.

- Sekundarno oštećenje. Kvar jedne komponente stroja ili motora može često rezultirati s puno većim oštećenjem. Npr. ako se otkrije navrijeme, zamjena defektnog ležaja može spriječiti nepopravljivo oštećenje i trošak u svezi sa zamjenom koljenaste osovine motora.

- Prekomjerno održavanje. Sustav periodičkog održavanja prema unaprijed planiranom rasporedu može rezultirati zahvatom održavanja prije nego je to stvarno bilo potrebno.

- Održavanjem učinjeni kvarovi. Potencijalna ljudska pogreška moguća je kad god se obavlja zahvat održavanja na motoru ili opremi. Greška kao što je nedovoljno stegnut vijak može rezultirati velikim oštećenjem motora. Smanjenjem broja zahvata smanjuje se i mogućnost ovakvih kvarova.

*Povećanje raspoloživosti* - brod mora imati porivni motor uvijek raspoloživ i u besprijekornom radnom stanju kad god je izvan luke, a dizelski motori generatora moraju uvijek biti u raspoloživom stanju kako bi bilo dovoljno električne energije za rad svih potrošača električne energije na brodu.

*Reduciranje potrošnje ulja* - kontrola ulja na degradiranje i kontaminiranje pokazatelj je njegove sposobnosti podmazivanja. Ako je rezervna kiselost i deterdžentnost nenarušena i kontaminiranost mala, interval zamjene ulja može se produžiti i tako uštedjeti na troškovima.

*Poboljšanje sigurnosti* - u zrakoplovstvu, ali i pomorstvu, otklanjanje svakog rizika raspoloživosti porivnog motora i opreme povećava sigurnost koja je uvijek na prvom mjestu.

Gotovo je nemoguće u današnjem kompetitivnom okruženju uspješnije poslovati bez nekog programa za predviđanje zahvata održavanja. Praćenje stanja na temelju analize ulja provjerena je tehnika koja vodi mnogo efikasnijoj uporabi sustava i uštedi novca.

## Literatura/Bibliography

### Instrukcijske knjige proizvođača Manufacturer's manuals

1. MAN B&W "Instructions for 50-90 MC type engines - operation" Edition 40A, 1994.
2. Spectro inc. "Spectroil M Oil Analysis Spectrometers" technical description
3. Žarko Koboević: "Utjecaj kvaliteta goriva i ulja na glavne brodske dizelske motore s osvrtom na moderne sustave za obradu goriva i ulja na brodovima" (diplomski rad), Pomorski fakultet, Dubrovnik 1991.

### Internet:

4. <http://www.bp.com/bpmarine/enermach.html>
5. [http://www.bp.com/bpmarine/enerc\\_1.html](http://www.bp.com/bpmarine/enerc_1.html)
6. [http://www.bp.com/bpmarine/enerc\\_3.html](http://www.bp.com/bpmarine/enerc_3.html)
7. <http://www.bp.com/bpmarine/Scene/jun 99/jun99p2.htm>
8. <http://www.bp.com/bpmarine/table.html>
9. [http://www.cat.com/products/parts/\\_n\\_service/09\\_S-O-S\\_progra...oil\\_analysis](http://www.cat.com/products/parts/_n_service/09_S-O-S_progra...oil_analysis)
10. <http://www.conditionanalyzing.com/lubeoil.html>
11. <http://www.desmaint.com/productLubriScan.html>
12. <http://www.fluitec.com/info/newprod1.html>
13. <http://www.natrib.com/appnotes/app01a.htm>
14. <http://www.natrib.com/appnotes/app20.htm>
15. <http://www.natrib.com/ent95.htm>
16. <http://www.plantservices.com/protected/pdm/mob.htm>
17. <http://www.plantservices.com/protected/ps1097/pdm127.shtml>
18. <http://www.spectroinc.com/Spectro/applications/applications.html>
19. <http://www.spectroinc.com/Spectro/products/products.html>
20. [http://www.wearcheck.ca/FYI/FYI000\\_001.htm](http://www.wearcheck.ca/FYI/FYI000_001.htm)

### Članci/Articles

21. Daniel P. Anderson / Malte Lukas: "Machine and Lubricant Condition Monitoring for Extended Equipment Lifetimes and Predictive Maintenance at Power Plants" - from "POWER-GEN '96" International Conference, 4-6. December 1996. (<http://www.spectroinc.com/Spectro/applications/applications.html>)
22. Daniel P. Anderson / Malte Lukas: "Analytical Tools to Detect and Quantify Large Wear Particles in Used Lubricating Oil" (<http://www.spectroinc.com/Spectro/applications/applications.html>)
23. Daniel P. Anderson / Malte Lukas: "Rotode Filter Spectroscopy, Does it Have a Place in the Commercial or Military Oil Analysis Laboratory?" (<http://www.spectroinc.com/Spectro/applications/applications.html>)
24. Bill Quesnel: "Direct-Reading and Analytical Ferrography" ([http://www.wearcheck.ca/FYI/FYI000\\_001.htm](http://www.wearcheck.ca/FYI/FYI000_001.htm))

Rukopis primljen: 28.6.2000.