

Gojko Marić, Vinko Ivušić

ISSN 0350-350X

GOMABN 41, 2, 87-101

Stručni rad/Professional Paper

UDK 621.434.12.001.53 : 621.892.097.2.099.2 : 620.193.1 : 620.186

PRAĆENJE TROŠENJA ČETVEROTAKTNOG MOTORA ANALIZOM ULJA

Sažetak

Potreba za što učinkovitijim održavanjem i mogućnošću kontinuiranog korištenja opreme razvila je čitav niz strategija i metoda održavanja opreme. Strategija održavanja po stanju, koja zahtijeva stalno praćenje i uvid u stanje opreme, uvjetovala je razvoj i primjenu analize ulja. Ovakva analiza, osim stanja maziva, daje sliku stanja opreme tijekom cijelog procesa korištenja bez nepotrebnih gubitaka zbog zaustavljanja opreme.

U ovome radu prikazani su rezultati analize ulja tijekom primjene u četverotaktnom motoru ferografijom i fizikalno kemijskim metodama s ciljem ocjene mogućnosti praćenja stanja motora pomoću analize ulja.

1. UVOD

Svakoga dana za odvijanje normalnog života u svijetu radi ogroman broj različitih tehničkih sustava, počevši od onih koji služe za proizvodnju energije, raznih proizvodnih pogona, transportnih sredstva i slično. U njihovom radu najveće probleme izazivaju negativne posljedice trenja i trošenja. Zbog toga se danas sve više važnosti pridaje problemima trenja i trošenja. Trenje uzrokuje velike gubitke u energiji dok trošenje dovodi do velikih gubitaka materijala od kojih su napravljeni dijelovi proizvodnih, transportnih i drugih sustava. Zaustavljanje takvih sustava zbog kvara i trajanje popravka izazivaju ogromne materijalne a moguće i ljudske gubitke.

Zato su se paralelno s razvitkom opreme razvijale strategije i pristupi održavanju. U početku se održavanju pristupalo tek kada je došlo do kvara, da bi se sredinom XX. stoljeća počelo s planiranjem zahvata na osnovi spoznaja iz

protoklog razdoblja. No, u zadnjih dvadesetak godina počelo se uvoditi metodu održavanja po stanju kojom se prateći određene parametre sustava određuje u kojem je stanju oprema i da li je potrebno izvršiti i u kojem opsegu zahvat održavanja.

U ovom radu dan je prikaz praćenja stanja trošenja četverotaktnog benzinskog motora jednim načinom održavanja po stanju u kojem se analizom ulja, točnije rečeno ferografskom analizom dobiva slika o stanju opreme odnosno o njezinom trošenju.

2. ANALIZA ULJA

S obzirom da svaki konstruktor stroja i složenih sustava kao ideal ima savršeni mehanizam, tj. čovjeka, onda je i logično da se održavanje takve opreme željelo približiti i održavanju zdravlja kod čovjeka. Povučemo li paralelu između strojeva i čovjeka, medij koji bi odgovarao krvi kod čovjeka bilo bi ulje kod strojeva. Osim što ima svrhu podmazivanja i time smanjivanja trenja i trošenja, ulje tijekom svog cirkuliranja strojem odnosi i čestice trošenja. Dakle, analiza ulja, u ovom slučaju ferografijom, mogla bi se izjednačiti s krvnim pretragama kod čovjeka, najčešće prvim korakom u analizama zdravstvenog stanja čovjeka.

Ako se želi održavati tehničke sustave tako, da imaju što manje zastoja i troškova koji slijede zbog otklanjanja zastoja i zbog toga što sustav ne obavlja svoju funkciju, onda tijekom cijelog rada sustava treba pratiti podatke koji govore o stanju ispravnosti opreme. Osobito je teško dobiti podatke o stanju opreme kod onih dijelova koji su nepristupačni za promatranje. U tim slučajevima analiza ulja ferografijom omogućuje kontinuirano praćenje stanja opreme i djelovanje na vrijeme u cilju sprečavanja neželjenih dugotrajnih zastoja ili kod transportnih sredstva havarija s možebitnim ljudskim gubicima.

3. FEROGRAFIJA

Ferografija je metoda kojom se izdvajaju čestice trošenja iz uzorka ulja za podmazivanje, te se slažu prema veličini na prozirni supstrat za proučavanje ili u vrlo glatku cijev za procjenu [2].

Prvi put je opisana 1972. godine [3] kao metoda za izdvajanje i proučavanje čestica materijala otkinutih s radnih površina dijelova tribosustava kao rezultat djelovanja procesa trošenja.

Čestice trošenja treba najprije izdvojiti iz medija kojim su nošene, a to je najčešće ulje za podmazivanje, ispušni plinovi dizelovog motora, rashladni mediji kod obradbe odvajanjem čestica, mlaz mlaznog motora i sl. To

odvajanje čestica se provodi putem magnetskog privlačenja odgovarajućim permanentnim magnetima.

Ferografska metoda se potvrdila kao uspješna tehnika za nadgledanje stanja zatvorenih sustava (motora).

3.1. Oprema za ispitivanje

Sva potrebna ispitivanja provedena su na uređajima koji se nalaze u Laboratoriju za tribologiju, Zavod za materijale, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Korišteni uređaji su:

- ferograf s direktnim učitanjem - **PMA 90 S**,
- uređaj za mjerenje ukupnog sadržaja zagađujućih tvari u ulju - **TCM-U**.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Ispitivanja su provedena na benzinskom četverotaktnom motoru, proizvođača Briggs&Stratton, snage 4 kW. U svrhu opterećenja motora, kako bi se izazvalo njegovo trošenje, na motor je spojen generator izmjenične struje i trošila u obliku električnih žarulja.

Odlučeno je da ispitivanje traje oko 400 sati, te da se uzorci ulja uzimaju svakih 12 sati, osim u razdoblju prve izmjene ulja kad su uzorci uzimani svaka 2 sata. Interval izmjene ulja i vrsta ulja izabrani su prema preporuci proizvođača motora, koji preporučuje za naše klimatske uvjete ulje oznake SAE 30 i zamjenu svakih 60 sati rada.

Na osnovi tog traženja izabrano je INA-SUPER 3 tražene gradacije.

5. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

Rezultati mjerenja mogu se vidjeti u tablicama 1 i 2, kao i na slici 4. U tablici 1 prikazane su vrijednosti WPC (Wear Particle Content) i TCM (Total Contaminants Measurement) za svih 37 uzoraka ulja. Za svaki uzorak mjerenje je ponovljeno tri puta, a na kraju je izračunata srednja vrijednost oba parametra.

Tablica 1: Izmjerene vrijednosti WPC i TCM za vrijeme trajanja ispitivanja
 Table 1: Table 1: WPC and TCM values measured during test duration

Uzora k broj	Sati rada	I mjerenje		II mjerenje		III mjerenje		Srednja vrijednost		Opaska
		WPC, %	TCM,%	WPC, %	TCM,%	WPC, %	TCM,%	WPC, %	TCM,%	
1	2	11,6	0,00	11,7	0,00	11,7	0,00	11,7	0,00	
2	4	29,2	0,06	29,3	0,05	29,2	0,06	29,2	0,06	
3	6	46,4	0,17	46,8	0,16	46,2	0,16	46,5	0,16	Zamjena ulja
4	18	4,4	0,00	4,5	0,00	4,4	0,00	4,4	0,00	
5	30	4,3	0,04	4,3	0,05	4,3	0,04	4,3	0,04	
6	42	3,3	0,07	3,7	0,07	3,8	0,07	3,6	0,07	
7	54	3,4	0,12	3,3	0,11	3,4	0,11	3,4	0,11	
8	66	2,5	0,13	2,6	0,13	2,5	0,13	2,5	0,13	Zamjena ulja
9	78	3,4	0,00	3,4	0,00	3,5	0,00	3,4	0,00	
10	90	4,2	0,03	4,2	0,03	4,1	0,04	4,2	0,03	
11	102	4,7	0,08	4,7	0,07	4,5	0,08	4,6	0,08	
12	114	3,9	0,09	4,0	0,10	3,9	0,10	3,9	0,10	
13	126	4,9	0,12	4,8	0,12	4,8	0,12	4,8	0,12	Zamjena ulja
14	138	3,3	0,00	3,2	0,00	3,3	0,00	3,3	0,00	
15	150	4,4	0,05	4,4	0,04	4,6	0,05	4,5	0,05	
16	162	5,0	0,07	5,0	0,07	5,0	0,07	5,0	0,07	
17	174	5,0	0,10	5,1	0,09	5,1	0,09	5,1	0,09	
18	186	5,1	0,13	5,0	0,15	5,0	0,13	5,0	0,14	Zamjena ulja
19	198	5,3	0,01	5,3	0,00	5,4	0,01	5,3	0,01	
20	210	7,4	0,02	7,5	0,02	7,4	0,01	7,4	0,02	Benzin u ulju
21	222	4,9	0,05	4,9	0,05	4,9	0,05	4,9	0,05	
22	234	4,7	0,08	4,8	0,08	4,8	0,07	4,8	0,08	
23	246	4,8	0,11	4,9	0,12	4,9	0,12	4,9	0,12	Zamjena ulja
24	258	4,9	0,01	4,8	0,00	4,8	0,01	4,8	0,00	
25	270	4,7	0,02	4,8	0,04	4,8	0,04	4,8	0,03	
26	282	4,9	0,08	4,8	0,06	4,9	0,08	4,9	0,07	
27	294	5,0	0,13	5,0	0,14	5,0	0,13	5,0	0,14	
28	306	4,7	0,02	4,8	0,02	4,7	0,02	4,7	0,02	Zamjena ulja
29	318	4,3	0,05	4,4	0,06	4,3	0,06	4,3	0,06	
30	330	4,5	0,09	4,6	0,09	4,6	0,10	4,6	0,09	
31	342	4,9	0,11	4,7	0,11	4,8	0,11	4,8	0,11	
32	354	5,3	0,14	5,2	0,15	5,4	0,15	5,3	0,15	
33	366	5,7	0,02	5,8	0,02	5,7	0,03	5,7	0,02	Zamjena ulja
34	378	6,0	0,09	5,9	0,09	5,9	0,09	5,9	0,09	
35	390	6,1	0,13	6,1	0,13	6,0	0,12	6,1	0,13	
36	402	6,0	0,15	6,2	0,16	6,2	0,15	6,2	0,15	
37	414	6,3	0,18	6,2	0,18	6,3	0,18	6,3	0,18	

Sample n / ° Operating hrs / 1st/ 2nd/ 3rd/ measurement / Medium value / Remark: Oil change / Gasoline in oil

Parametar WPC ukazuje na intenzitet trošenja, tj. stanje motora, dok TCP govori o stanju ulja. Vrijednosti parametra WPC u ovisnosti o vremenu prikazane su na slici 6. Iz slike se može vidjeti da nakon početnog rasta broja čestica trošenja, što se može pripisati razdoblju uhadavanja motora, krivulja broja čestica trošenja ima lagani porast što objašnjavamo kao normalno trošenje motora.

Jedini "ispad" je u 210. satu rada kada nastaje naglo povećanje broja čestica (strelica). To je bio znak za detaljniji pregled prilikom čega je utvrđena prisutnost goriva u spremniku ulja. Nakon što je utvrđen i otklonjen razlog miješanja benzina u ulju, trend rasta broja čestica trošenja WPC odvijao se po istoj zakonitosti.

Vrijednosti TCP nisu prikazane dijagramom jer su promjene na ulju bile toliko male da su zanemarive. To se može objasniti kvalitetom ulja, ali i kratkoćom intervala zamjene ulja (samo 60 sati).

Osim ove analize, načinjeno je ispitivanje ulja u laboratorijima INA Maziva Rijeka. Rezultati te analize mogu se vidjeti u tablici 2. Ispitivano je ulje nakon svake izmjene, pa je tako dobiveno 8 uzoraka.

Tablica 2: Promjena svojstava ulja i sadržaja metala u ulju tijekom ispitivanja
Table 2: Change of oil properties and metal content during the tests

Br	Svojstvo	Metoda	Jedinica mjere	Izmjena ulja							
				I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	Sati rada motora		sat	6	66	126	186	246	306	366	414
2	Viskoznost na 100°C	ASTM D445	mm ² /s	10,22	10,87	10,74	10,5	10,15	10,31	10,15	9,95
3	Ukupni bazni broj, TBN	ASTM D2896	mgKOH /g	9,1	9,3	9,5	9,6	9,5	9,5	9,5	9,8
4	Netopljivo u n-pentanu	ASTM D893	% m/m	0,02	0,03	0,02	0,01	0,04	0,05	0,02	0,01
5	Metali: Ca	ICP-OES	mg/kg	2820	3100	3070	3060	3000	3040	3070	3380
6	P	ICP-OES	mg/kg	946	897	911	918	932	949	950	817
7	Zn	ICP-OES	mg/kg	1090	1070	1060	1050	1080	1070	1070	919
8	Fe	ICP-OES	mg/kg	18	14	14	21	59	29	20	20
9	Cr	ICP-OES	mg/kg	3	3	2	2	4	3	2	2
10	Mo	ICP-OES	mg/kg	8	3	2	2	3	1	2	2
11	Sn	ICP-OES	mg/kg	5	14	24	31	14	21	19	15
12	Pb	ICP-OES	mg/kg	23	8	6	10	10	4	4	5
13	Cu	ICP-OES	mg/kg	21	4	2	2	30	1	1	1
14	Na	ICP-OES	mg/kg	12	7	6	6	8	6	6	4
15	Mg	ICP-OES	mg/kg	122	22	13	13	15	12	12	22
16	B	ICP-OES	mg/kg	18	0	0	0	4	0	0	0
17	Al	ICP-OES	mg/kg	20	9	7	7	40	13	8	8
18	V	ICP-OES	mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0
19	Si	ICP-OES	mg/kg	15	5	4	4	18	7	4	5

Property: Engine's operating hrs/Viscosity at 100°C/Total Base N/n-pentane insoluble/Metals/Method/Unit of measure/Oil change

I ovo istraživanje potvrdilo je povećano trošenje (povećan udio Fe, Cu, Al i Si – zasjenjena polja) za razdoblje u kojem je došlo do miješanja goriva u ulju.

Na slikama 7 i 8 mogu se vidjeti tragovi trošenja na klipu i cilindru.

6. ZAKLJUČAK

Iz svega navedenoga može se zaključiti, da je ferografija kao jedna od metoda analize ulja, iznimno prikladna za praćenje trošenja zatvorenih sustava. Ovakvom metodom može se optimirati održavanje, odnosno svesti zastoje, a time i troškove odražavanja, na minimum.

Redovitim praćenjem vrijednosti WPC mogu se na vrijeme uočiti počeci intenzivnijeg trošenja što je signal da je potrebno provesti određene zahvate kako bi se izbjegli zastoji. U tom se slučaju analizom veličine, oblika i boje čestica trošenja može donijeti procjena o mehanizmu trošenja, a analizom kemijskog sastava čestica trošenja indicirati mjesto trošenja odnosno dio koji se troši.

Ono što analiza ulja također pruža jest i mogućnost praćenja stanja ulja u sustavu, te mogućnost optimiranja intervala zamjene ulja.

Veliku pomoć u izvođenju ovog ispitivanja dali su INA d.d. koja je donirala motorni benzin i ulje potrebno za ispitivanje, te tvrtka MPS iz Ivanić Grada, zastupnik tvrtke Briggs&Stratton koja je donirala motor i generator.

Slika 1: Razvoj koncepcija održavanja (4)
Figure 1: Maintenance concept development (4)

Maintenance methods and concepts/Corrective maintenance/Planned maintenance/Total productive maintenance /TPM Maintenance by condition/Expert maintenance systems/Self-maintenance /Years

Slika 2: PMA 90 S
Figure 2: PMA 90 S

Slika 3: TCM-U
Figure 3: TCM-U

Slika 4: Ispitivani motor s generatorom
Figure 4: Tested engine with generator

Slika 5: Trošila – opterećenje motora
Figure 5: Electric bulbs – engine load

Slika 6: Promjena vrijednosti parametara WPC za vrijeme trajanja ispitivanja
Figure 6: Change in teh WPC parameter values during test duration

Slika 7: Tragovi trošenja na klipu
Figure 7:Wear traces on the piston

Slika 8: Tragovi trošenja na cilindru
Figure 8:Wear traces on the cylinder

MONITORING OF FOUR-STROKE ENGINE WEAR BY OIL ANALYSES

Abstract

The need for more effective maintenance and possibility of continuous exploitation of equipment has developed numerous strategies and methods for machinery maintenance. The maintenance strategy by condition, that requires continuous monitoring and equipment overlook, has initiated the development and use of oil analysis.

In this work are presented the results of oil analysis examination during application in four-stroke engines by ferrografic and physico-chemical methods in order to evaluate possibilities of engine condition monitoring by oil analysis.

1. INTRODUCTION

Every day, in order for ordinary life to continue, a large number of various technical systems remains operative worldwide: for energy generation, various production plants, means of transportation, and the like. Their operation is mostly complicated by the negative effects of friction and wear. That is why today the issues of friction and wear are receiving increasing attention. Friction causes major energy losses, while wear leads to major losses of materials constituting parts of production, transportation, and other systems. The halt of such systems due to breakdown and the repair duration cause huge material, and possibly even human losses.

That is why equipment development has been accompanied by maintenance strategies and approaches. Initially, maintenance usually followed failure, but, towards the middle of the 20th c., plans started to be made based on realizations from the previous period. However, over the last about twenty years, the maintenance method has consisted in determining – using certain system parameters – the equipment condition and evaluating whether overhauls are necessary and to which extent.

The present paper provides a review of monitoring four-stroke gasoline engine wear using the method by condition in which, using oil analysis i.e. ferrographic analysis, an insight is obtained into the equipment's condition i.e. its wear.

2. OIL ANALYSIS

Given that each designer of machines and complex systems has as an ideal the human creature i.e. the perfect mechanism, it is only logical that maintenance of such equipment aims at human health preservation. If we were to compare man to machine, the medium that would correspond to human blood would be lubricating oil. Apart from its lubrication purpose, thus reducing friction and wear, during its circulation through the machine, oil takes away wear particles. Oil analysis – in this case using ferrography – could thus be compared to human blood tests – usually the first step in evaluating man's health condition.

If we wish to maintain technical systems so that they have as little halts and costs caused by halt removal or system failure, we must monitor data indicating equipment condition throughout the system's operation. It is especially difficult to obtain data on equipment condition for parts which cannot be observed due to their position. In such cases oil analysis through ferrography enables a continuous equipment condition monitoring and timely response in order to prevent undesirable prolonged halts, or – when it comes to means of transportation – accidents with possible casualties.

3. FERROGRAPHY

Ferrography is a method isolating wear particles from the lubricating oil sample, and positioning them by size on a transparent substrate or a very thin evaluation tube /2/. It was described for the first time in 1972 /3/ as a method for isolating and examining material particles originating from tribological systems' operating surfaces as a result of the wear process.

The wear particles first have to be isolated from the medium carrying them, most frequently being lubricating oil, diesel engine exhaust gases, metalworking coolants jet stream from jet engine, and the like. This particle separation is done through their magnetic attraction using suitable permanent magnets.

The ferrographic method has proven to be a successful technique for monitoring the condition of closed systems such as engines.

3.1 Test Equipment

All the necessary tests were performed on devices at the Laboratory of Tribology, Institute for Materials, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Construction in Zagreb. The devices used were:

- ferrograph with direct input – PMA 90 S
- device for measuring total pollutants content in oil – TCM-U.

4. THE EXPERIMENTAL PART

The tests were performed on a 4 kW four-stroke gasoline engine manufactured by Briggs&Stratton. In order to load the engine and hence cause its wear, it was coupled to an alternating current generator and electric light bulbs.

It was decided that the test should last around 400 hours, and that oil samples be taken each 12 hours, except during the first oil fill period, when samples were taken each 2 hours. Oil change intervals and oil type were selected in accordance with the engine manufacturer's recommendation: for our climatic conditions, viscosity SAE 30 and oil change after each 60 hours of operation.

Based on the recommendation, we have chosen the INA-SUPER 3 oil of the required viscosity grade.

5. TEST RESULTS AND DISCUSSION

The measurement results may be seen in Tables 1 and 2, as well as in Figure 4.

Table 1 shows values for WPC (Wear Particle Content) and TCM (Total Contaminants Measurement) for all 37 oil samples. For each sample, measurement was repeated three times, and, in the end, medium value of both parameters was calculated.

The WPC parameter indicates wear intensity i.e. engine condition, while TCP points to oil condition. The values of the WPC parameter in dependence of time are shown in Figure 6. The Figure shows that after the initial increase of the wear particles number – which may be attributed to the engine's running-in period, the WPC had a slight increase, explained as normal engine wear. The only problem arose in the 210th hour of work, with an abrupt increase in the number of particles. This caused a more detailed review, indicating the presence of fuel in the oil tank. After the cause for this was discovered and removed, the WPC increase trend proceeded after the same pace.

TCP values are not shown in the diagram because changes in oil were so slight as to be neglectable. This may be explained by oil quality, but also with very frequent oil change intervals (only 60 hours).

Apart from this analysis, oil was also tested in the laboratories of "INA Maziva – Rijeka". The results of this analysis may be seen in Table 2. The oil was tested after each change, so that there were 8 samples.

This test also confirmed increased wear (increased share of Fe, Cu, Al and Si – shaded parts) for the period when fuel was mixed with oil.

Figures 7 and 8 show wear traces on piston and cylinder.

6. CONCLUSION

It may be concluded from the above that ferrography, as one among the oil analysis methods, is extremely suitable for monitoring the wear of closed systems. Such a method may optimize maintenance i.e. reduce halts and hence also maintenance costs down to a minimum.

Regular monitoring of WPC values may enable timely spotting of increased wear, signalling the need to undertake certain steps in order to avoid halts. In this case, analysis of the wear particle size, shape, and colour may enable an estimation of the wear mechanism, while the analysis of the wear particles' chemical composition indicates the wear spot i.e. part. Oil analysis also offers the possibility of monitoring the condition of oil in the system, and the possibility of optimizing oil change intervals.

A major support in the performance of this test was offered by INA d.d., who provided the necessary motor gasoline and oil, and by the MPS company from Ivanić Grad, representative of the Briggs&Stratton company, who donated the engine and the generator.

Literatura / References:

1. Ivušić V; "Tribologija", HDMT, Zagreb, 1998.
2. W. Hoffmann; Wear; br. 65 (1981); str. 307-313.
3. W.W. Seifert, V.C. Westcott; Wear; br. 21 (1972); str. 27-42.
4. Marić. G: "Istraživanje i razvoj podloge za ekspertni sustav za održavanja proizvodne opreme", Magistarski rad, FSB-Zagreb, Zagreb 1993.
5. Rakesh Sarin i sur.: Development of N, P and S-Containing Multifunctional Additives for Lubricants, Lubrication Engineering, **53**, May, 19-26, 1997.
6. Toms LA; "Machinery Oil Analysis", Costal Skills, Tulsa, 1998

ključne riječi:

621.434.12 Benzinski četverotaktni motor
.001.53 Gledište prediktivnog održavanja
621.892.097.2.099.2 Motorno ulje za
benzinske motore
620.193.1 Ferografija
620.186 Mikroskopsko ispitivanje materijala

key words:

Four stroke gasoline engine
Viewpoint of predictive maintenance
Gasoline engine oil
Ferrography
Microscopic examination of material

Autori/Authors:

Gojko Marić, Vinko Ivušić
Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zavod za materijale

Primljeno/Received:

25.3.2002.