

DIJAGNOSTIKA KVAROVA SUSTAVA GORIVA U PORIVNIM BRODSKIM MOTORIMA

Failure Diagnostics of Marine Engine Fuel Supply System

Ivica Domić, dipl. ing., diplomant
Brodograđevna industrija Split, Put udarnika b.b., Split

dr. sc. Gojmir Radica, izv. prof., mentor
Pomorski fakultet Split, Zrinsko-Frankopanska b.b., Split

dr. sc. Maro Jelić, doc., komentor
Sveučilište u Dubrovniku, Pomorski odjel, Ćira Carića 4, Dubrovnik
E-mail: maro.jelic@unidu.hr

UDK 621.43:629.12
665.7:629.12

Sažetak

Sustav goriva brodskih motora opisujemo kao jedan od osnovnih, a da pritom moramo biti i svjesni njegove višestruke uloge, ekonomske, ekološke i energetske.

Razvoj i poboljšanje sustava kretala su se u više različitih smjerova. Teži se tome da razina sumpora u gorivu stremi prema nuli uz konstantnu regulaciju TBN ulja, usto je gorivo bolje pročišćavano, uvedeno je ubrizgavanje emulzije goriva i vode u cilindar motora, razvijaju se i ugrađuju SCR (selective catalytic reduction) katalizatori ispušnih plinova, razvijaju se motori s mogućnošću rada na dvojno gorivo i uvode se inteligentni motori. Takvi su motori sposobni nadzirati parametre motora, dijagnosticirati stanje i rješavati probleme u realnom vremenu bez ljudskog utjecaja.

Summary

A marine engine fuel system is described as one of essential, yet we have to be aware of its complex role on today's marine market, economically, ecologically and energetically.

Improvement is developed in many different ways. Sulphur oil amount gravitate to zero with constant regulation of TBN oil number, fuel is better purified, emulsion of the fuel and water is injected into the cylinder, SCR catalytic exhaust gas reduction is developed, hybrid dual fuel engine is developed and finally today's different engines are called intelligent.

That type of engine is capable to analyse, anticipate and resolve the problem in real time without human influence.

UVOD / Introduction

Dijagnostika sustava goriva koja obuhvaća dugoročnu i detaljnu analizu goriva, od njegove narudžbe pa sve do

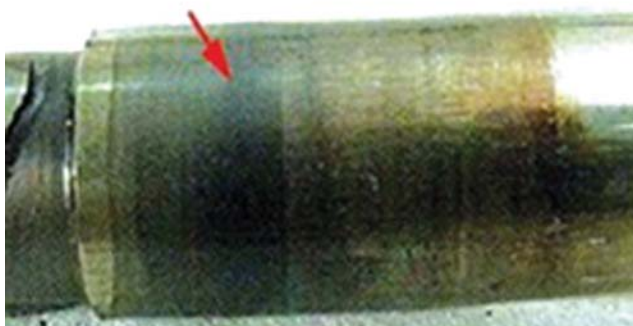
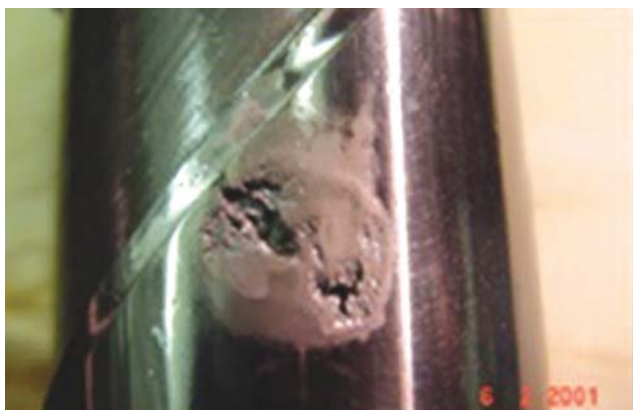
ispitivanja ispušnih plinova, i analizu funkcionalnosti svih elemenata sustava, ima izravan utjecaj na optimalnu iskoristivost pogonskih brodskih motora.

Utjecaj vode / *Water influences*

Zastupljenost vode u gorivu je očekivano i njezin se negativan utjecaj očituje u stvaranju emulzije s koaguliranim gorivom, koja stvara mulj taložen na dnu tankova i u sustavu goriva. Sljedeći nepoželjan utjecaj vode je u isparivanju zbog visokih temperatura i tlakova, te u pojavi kavitacije. Naime, evaporirani mjehurići pucaju i abrazivno djeluju na metalne površine stvarajući učinak tzv. pitting- korozije.

Voda zajedno sa sumporom ili klorom stvara spojeve H_2SO_4 , HCl , koji na metalnim površinama dovode do niskotemperaturne korozije, nadasve u ispušnim cjevovodima i kotlovima.

Prevencijazatakvureakciju je održavanje temperature metalnih površina ispušnih cjevovoda i ispušnih kotlova više od 115 do 160 °C, što je temperatura kondenzacije sulfatne kiseline. Prema standardima, sadržaj se vode ograničava do 0,5% za teška goriva.



Slika 1. Pojava korozije zbog utjecaja vode na metalnim površinama klipa visokotlačne pumpe za gorivo

Figure 1. Corrosion as a result of water influences on metal surfaces of high pressure fuel pump piston



Slika 2. Niskotemperaturna korozija na gornjem dijelu košuljice

Figure 2. Low temperature corrosion on upper part of cylinder liner

Utjecaj vanadija / *Vanadium influences*

Element vanadij, koji je otopljen u gorivu u količini od 150 do 600 ppm, pa se ne može odstraniti pročišćavanjem, i element natrij, kojega ima u morskoj vodi u količinama od 50 ppm naviše, pomiješani dostižu omjer 1 : 3 i uzrokuju visokotemperaturnu koroziju taloženjem oksida na površinama izloženima visokim temperaturama. To su dosjedi ispušnih ventila, ispušni kanali i turbinske lopatice.

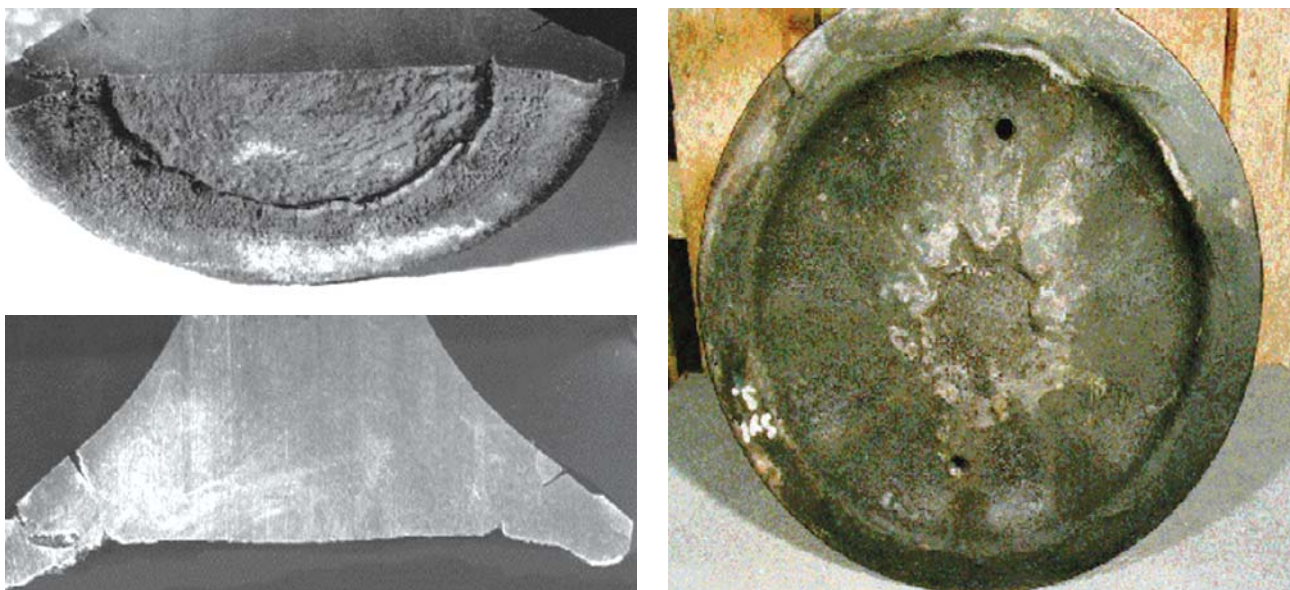
Vanadij se pretežno nalazi u srednjoviskoznim gorivima i teškom gorivu. Količina mu može biti i do 0,02% mase goriva. To je jedan od razloga da je nemoguća i uporaba takvih goriva u plinskoturbinskim uređajima. Za te strojeve goriva ne smiju sadržavati vanadija više od 0,0004%. Pri izgaranju vanadijev se pentoksid (V_2O_5) izlučuje na okolne površine, i tu jako korozivno djeluje pri temperaturama od 420 do 690 °C jer je tada taj spoj u rastaljenom stanju.

Natrij iz goriva može uz utjecaj morske vode uzrokovati spoj Na_2SO_4 , i on se spaja s vanadijevim pentoksidom stvarajući spojeve $NaVO_3$ i $Na_4V_2O_7$.

Spomenuti spojevi tale se pri temperaturama od 630 °C. U rastaljenom stanju oni zatim prodiru u pukotine, razaraju slojeve metala i ubrzavaju oksidaciju pri visokoj temperaturi, pa trošenje materijala raste.

Sadržaj natrijevih sulfata snižuje temperaturu na kojoj se razvija vanadijevo korozijsko djelovanje, što može biti manje od 630 °C.

Korozivno djelovanje osobito je jako na ispušnim ventilima i dosjedima (slika 3.). Motorima koji rade na teško gorivo hlade se ispušni ventili i njihovi dosjedi, a nekim se motorima ventili zakreću za vrijeme rada radi ravnomjernog trošenja.



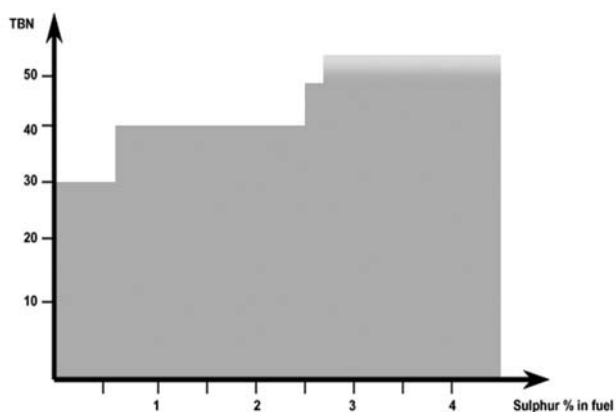
Slika 3. Visokotemperaturna korozija na ispušnom ventilu dizelskoga motora

Figure 3. High temperature corrosion on diesel engine exhaust valve

Pri nižim temperaturama vanadij djeluje kao katalizator i ubrzava izgaranje sumpora.

Natrij ne možemo odstraniti pročišćavanjem, već je potrebna zaštita od njegova utjecaja ugradnjom materijala, npr. Nimonic ili Inconel, za turbinske lopatice.

Utjecaj sumpora / Sulphur influences



Slika 4. Odnos potrebnoga TBN u ulju prema postotku sumpora u gorivu

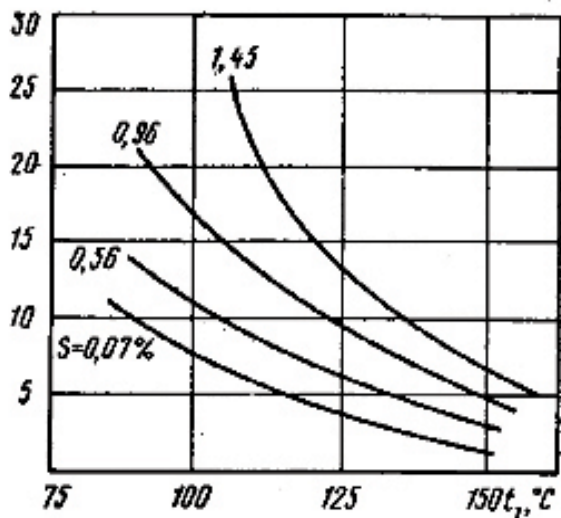
Figure 4. Relation connecting the necessary value of TBN in lubricating oil regarding to amount of sulphur in fuel

Goriva koja se koriste za brodske dizelske motore karakteristična su po velikom sadržaju sumpora, u elementarnom stanju ili u spojevima. Zastupljenost mu se ograničava, ali u teškim gorivima koja se danas rabe njegov udio ponekad premašuje i 4,5%. Ako se sumpor u gorivu nalazi kao aktivni sumporovodnik, štetan je i prije izgaranja jer djeluje na uređaje za dovod goriva, posebno na bakar i njegove slitine.

Sumporni spojevi koji nastaju izgaranjem goriva jedan su od najutjecajnijih čimbenika u koroziji košuljice cilindra motora. Kao produkt izgaranja sumpora pojavljuju se sumporni dioksid ili sumporni trioksid (SO_2 , SO_3). Vanadij iz goriva za vrijeme izgaranja formira vanadijev pentoksid (V_2O_5), i on djeluje kao katalizator pri izgaranju sumpora tako da je rezultat oksidacije više sumpornog trioksida nego dioksida.

Simporni trioksid, u spoju s vodenom parom koja se nalazi u produktima izgaranja, stvara agresivnu sumpornu kiselinu (H_2SO_4) pa ona uzrokuje koroziju košuljice i stapnih prstenova na mjestima gdje dođe do kondenzacije pare.

Produkti izgaranja sumpora i njegovi spojevi povećavaju abrazivno trošenje kliznih dijelova, zbog formiranja čvrstih čestica i zbog porasta njihove tvrdoće. Na slici 5. prikazana je ovisnost trošenja košuljice cilindra o temperaturi površine pri raznim postotcima sumpora u gorivu.

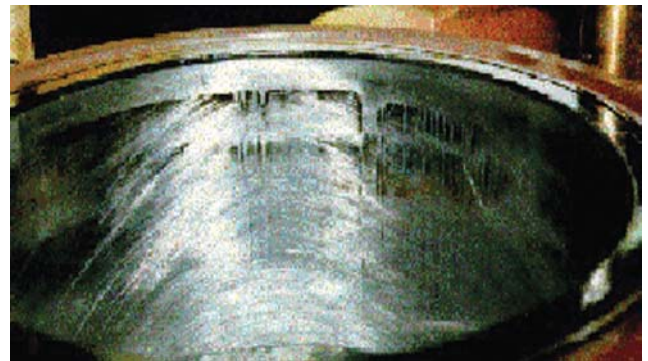


Slika 5. Ovisnost trošenja košuljice cilindra u μm o postotku sumpora i o temperaturi

Figure 5. Cylinder liner wearing in μm , depending on amount of sulphur in fuel and on temperature

Utjecaj pepela / Ash influences

Pepeo se određuje prema masi goriva u postotcima. Može biti anorganskoga i mineralnog podrijetla, a sastavni je dio nafte ili se gorivo kontaminira tijekom eksploatacije hrđom, pepelom i pijeskom. Vanadij, kojeg ima i u pepelu, abrazivno razara tarne površine (slika 6.). U dizelskim se gorivima postotak pepela ograničava na 0,01%, a u mazutu do 0,2%.

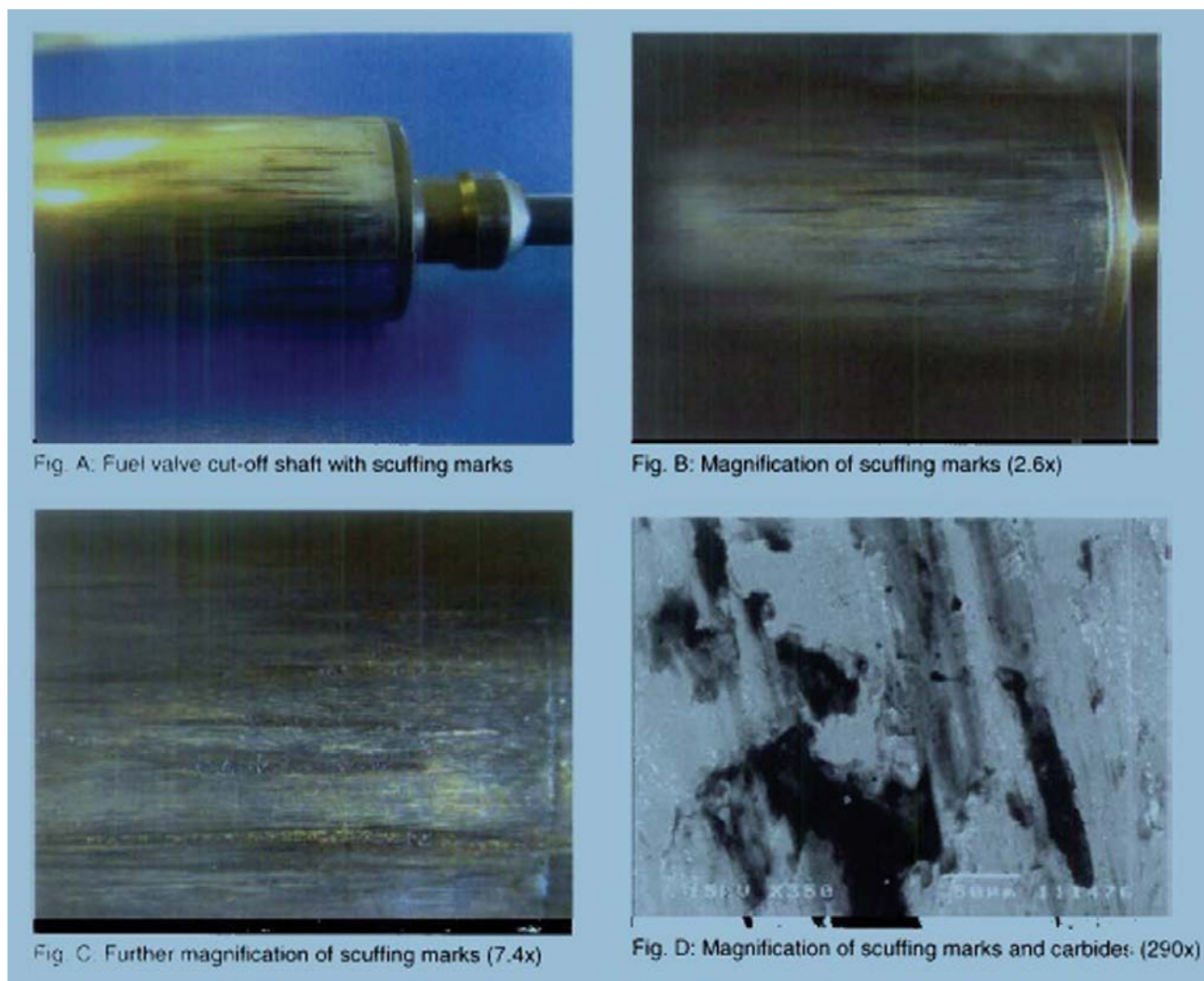


Slika 6. Pepelom oštećene površine košuljica
Figure 6. Cylinder liner surfaces damaged by ash

Utjecaj katalitičkih čestica / Catalitic solids influences

Katalitičke čestice aluminija i silicija po abrazivnom su djelovanju slične pepelu. Čestice su ostatci katalitičkih aditiva pri rafinaciji nafte, prvenstveno aluminija i silicija. Standard ISO 8217-2005 dopušta najviše 80 mg/kg čestica promjera od $30\ \mu\text{m}$, što se mora osigurati u postupku separacije goriva. Proizvođači dizelskih motora najčešće se ograničavaju na 12 ppm jer se očekuje da uporaba goriva s česticama aluminija i

silicija većima od 12 ppm ubrzano oštećuje klizne površine pumpe goriva, rasprskavača i košuljica.



Slika 7. Oštećenja na površinama pumpe goriva nastala učinkom katalitičkih čestica

Figure 7. Surfaces of fuel pump damaged by catalitic solids

Utjecaj smolastih tvari / *Sediment influences*

Utjecaj smolastih tvari definira se s TSP - *total sediment potential* ili TSE – *total sediment effective*, što govori o potencijalnoj kemijskoj reakciji, zgušnjavanju i taloženju težih čestica na dno tanka, na elementima filtra, na otvorima pumpe goriva i rasprskavača, ili prilikom izgaranja unutar cilindra dizelskih motora.

Čestice anorganskog materijala (željezni oksid) sastavni su dio nerafinirane nafte pa se one velikim dijelom separiraju od preostalih destiliranih frakcija. Organske molekule veće težine, kao što je asfalten, pri nestabilnosti (zbog miješanja teških molekula s lakšim parafinima u procesu rafiniranja nafte) imaju tendenciju koaguliranja – zgušnjavanja i taloženja u obliku sedimenata. Pojava je osobito zastupljena u tankovima goriva jer koagulacija ovisi o vremenu i temperaturi. Izmiješani s vodom, ti sedimenti, zbog eventualne loše

separacije goriva, čine talog mulja na dnu dnevnih tankova na filterima za gorivo.

Zatim, djelovanjem visoke temperature sedimenti se tale i lijepe na metalne površine stapa, ispušnih ventila i rasprskavača, stvarajući čađu (sliku 8.).



Slika 8. Čađa na kruni stapa
Figure 8. Ash on the piston crown

Da bi se spriječilo stvaranje taloga, preporučuje se izbjegavati miješanje goriva različitih tipova ili je potrebna prethodna provjera njihove inkompatibilnosti. Nastanak smola ovisi o udjelu u gorivu nezasićenih ugljikovodika sklonih oksidaciji. Ulja za podmazivanje motora ne smiju sadržavati tvrdog asfalta.

Visoki TSP ili ukupni potencijal taloženja goriva može upozoriti na mogući nastanak taloga u određenom vremenu pri normalnim skladišnim uvjetima, pa se zbog toga ograničava na 1000 mg/kg.

Utjecaj mikrobiološke korozije / *Microbiological corrosion influences*

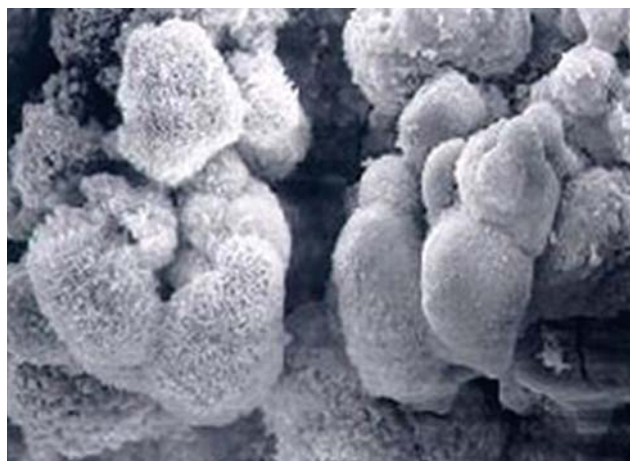
Ako izostane čišćenje tankova, uz nazočnost vode razvijaju se mikroorganizmi. Općenito, i najmanja količina vode pri temperaturama od 15 do 40 °C, nadalje u tropskim područjima, dostatna je za razvoj mikroba, bakterija i gljivica, koje nakon određenog vremena rezultiraju *pitting*-korozijom (slika 9.).



Slika 9. Rupičasta pitting korozija unutar tanka za gorivo

Figure 9. Pitting corrosion inside the fuel tank

Pri jačem miješanju sadržaja u tanku ili miješanju dviju vrsta goriva, dolazi do pojave mikroorganizama u sustavu goriva, gdje redovito začepljuje filtre i remete rad separatora.



Slika 10. 700 puta uvećana slika mikroorganizama

Figure 10. Picture of micro-organisms multiplied by 700

Primjeri dijagnostike kvarova u sustavu goriva / *Examples of fuel system failures diagnostics*

Na sljedećim primjerima prikazani su postupci analize stanja, s objašnjenjem negativnih utjecaja, elementa sustava goriva u pogonskim dizelskim motorima.

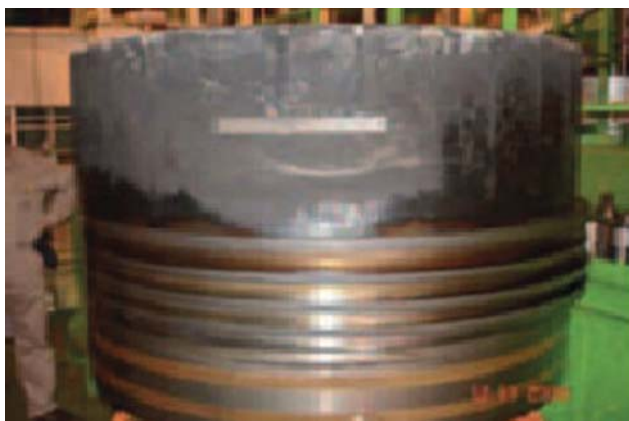
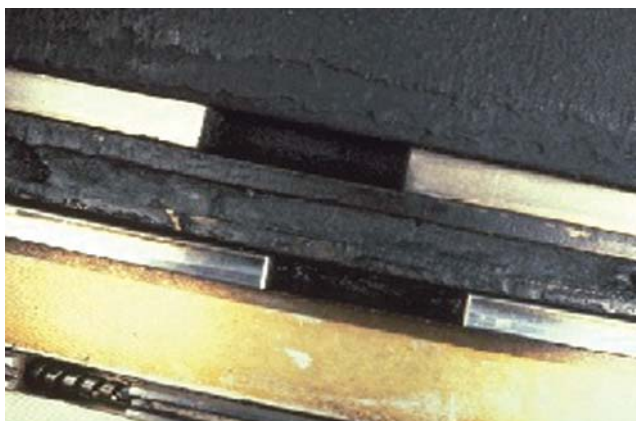
Na slikama 11. i 12. razmatrano je stanje stapnih prstenova nakon kratkotrajne eksploatacije dizelskog motora, gdje je čađa prekrila površinu stapa. Nataložena čađa nije ispunila utore prstenova i pri tome smanjila njihovu površinu poprečnog presjeka. Prstenovi imaju dostatno zračnosti za nesmetan rad.

Danas je realno procijenjeno vrijeme između redovitih pregleda stanja prstenova i cilindara, i do 30.000 radnih sati.



Slika 11. Stapni prstenovi na stapu

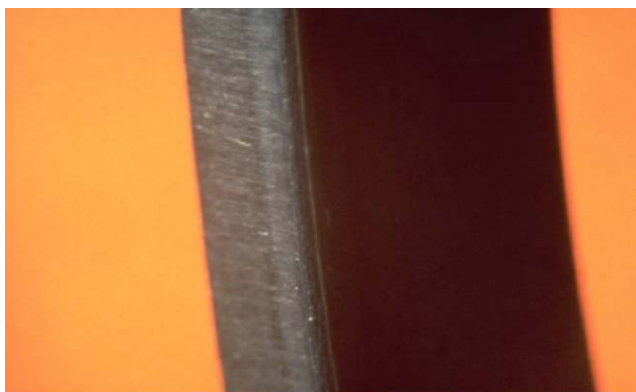
Figure 11. Piston rings on the piston



Slika 12. Čađom prekrivena kruna stapa
Figure 12. Piston crown covered by ash

Na slici 13. vide se oštećenja na površini stapnog prstena nastala djelovanjem abrazivnih čestica u cilindru motora. One se tu mogu naći zbog onečišćenog zraka ili loše pročišćenoga goriva.

Zastupljenost je abrazivnih čestica precizno određena po ISO 6245 za pepeo (u destilatima DMX – DMB ne smije ga biti, a za DMC 500 mg/kg, dok je za rezidualna goriva RMA – RMK najviše 1.000 – 1.500 mg/kg) i ISO 10478 za katalitičke ostatke aluminija i silicija (u destiliranim gorivima DMX – DMB ne smije ih biti, a za DMC najviše 25 mg/kg; u rezidualnim gorivima RMA – RMK najviše 80 mg/kg).



Slika 13. Trenjem oštećen čeonni dio stapnog prstena
Figure 13. Outside part of piston ring damaged by friction

Na slici 14. vidi se oštećenje vanjskog ruba stapa koje se može pripisati lošem radu rasprskavača goriva. Kroz neispravan rasprskavač istječe prevelika količina goriva, i ono ne izgara, nego ispire rub stapa.



Slika 14. Oštećenje vanjskih dijelova krune stapa
Figure 14. Damage of piston crown outside part

Karbonizirani ostatci što ostaju trajno zalijepljeni na kompresijskom dijelu stapne krune, upućuju na loše izgaranje ili veliku količinu karbonskih ostataka u gorivu. Oštećenja, strugotine i promjena boje između kompresijskih prstenova dokazuju da karbonizirani ostatci mogu biti razlogom pojačanoj sili trenja.

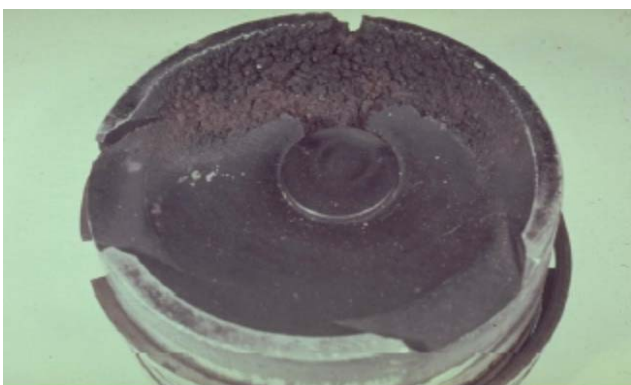
Prema ISO 10370 karbonski su ostatci u gorivu ograničeni na 2,5 g/kg za lako gorivo tipa DMC, dok su za teško gorivo tipa RMA – RMK najviše 10- 22g/kg.

U primjeru lošeg izgaranja, detaljna analiza cijelog sustava, počevši od ukrcaja goriva u skladišne tankove, pa daljnjeg tretmana, pročišćavanja, sve do dovođenja goriva u cilindar - treba poslužiti u rješenju problema.



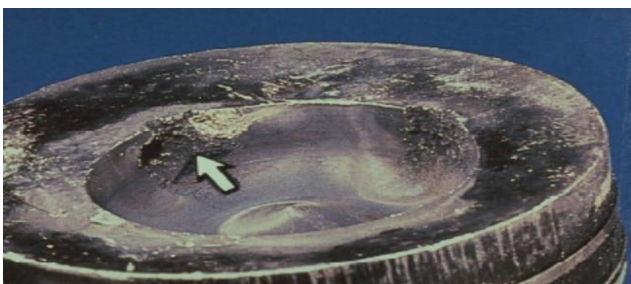
Slika 15. Oštećenje zbog lošeg izgaranja u cilindru
Figure 15. Damage as a result of bad combustion in cylinder

Na slici 16. primjer je očitoga taloženja mulja na ispušnom ventilu, što je dokaz za loše ispiranje svježim zrakom, a ne za loše izgaranje.



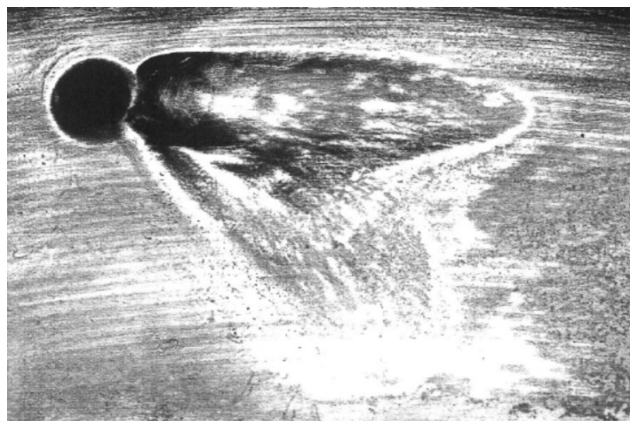
Slika 16. Oštećenje učinkom lošega ispiranja u cilindru
Figure 16. Damage as a result of bad scavenging process in cylinder

Na slici 17. vide se znatna oštećenja stapa, čemu bi uzrok moglo biti rasprskavanje goriva u pogrešnom trenutku, zbog čega nastaje veliki porast sila na stapnoj kruni.



Slika 17. Oštećenje uzrokovano pogrešnim kutom pri ubrizgavanju goriva
Figure 17. Damage as a result of wrong fuel injection angle

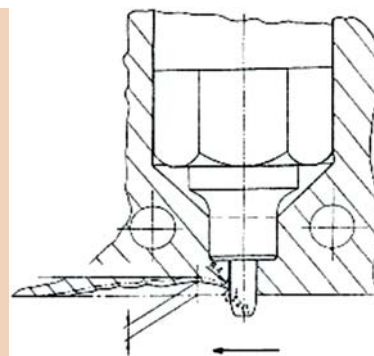
Oštećenje nastalo odmah do provrta rasprskavača goriva je erozijsko/korozivnog tipa (slika 18.). Njezin bi uzrok mogao biti ili loše rasprskavanje ili nekvalitetno gorivo s većim postotkom čestica i vode od dopuštenoga.



Slika 18. Abrzivno oštećenje glave cilindra
Figure 18. Abrasive damage of cylinder head

Prema uputama proizvođača Wartsila, za RTA motore najveća dopuštena dubina oštećenja na glavi cilindra je 8 mm. Oštećenje je potrebno navariti novim materijalom i obraditi ga.

Slika 19. Najveća dopuštena dubina oštećenja na glavi cilindra
Figure 19. Maximum allowed depth of cylinder head damage



S druge strane, slika 20. dokazuje ispravan rad rasprskavača i uporabu kvalitetnoga goriva. U području provrta nema vidljivih erozivnih oštećenja a crni talog čađe je pravilno raspoređen.

Slika 20. Najveća dopuštena dubina oštećenja glave cilindra
Figure 20. Correct position of fuel injector



Na slici 21. predočeno je dobro stanje baze ispušnog ventila i dosjeda, dokazujući ispravan rad cijelog sustava goriva.

Fotografija je uzeta nakon čak 32.000 radnih sati, što se pretpostavlja kao najbliža granica za sporokretne i srednjokretne pogonske brodske motore prije glavnoga remonta.



Slika 21. Ispravno stanje ispušnog ventila
Figure 21. Correct condition of exhaust valve



Slika 22. pruža ogledni primjer kontaminacije goriva smolastim smjesama težih molekula asfaltena, koje imaju tendenciju taloženja na donjim dijelovima stapne krune, gdje su uzrok toplinskoj izolaciji hlađenja stapa. Dosegne li se temperatura od $\approx 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, stvaraju se uvjeti za kemijsku reakciju s katalitičkim česticama vanadija i natrija.

Rastopljena masa uzrok je korodiranja stapne glave zbog utjecaja visokotemperaturne korozije.



Slika 22. Korodirana stapna glava srednjokretnoga dizelskog motora
Figure 22. Corrosion of medium speed diesel engine cylinder head

ZAKLJUČAK / Conclusion

Svrha je ovom radu istaknuti važnost dijagnostike sustava goriva pri zaključivanju o općem stanju pogonskih brodskih motora. Optimizacija iskoristivosti postrojenja tako neizostavno zahtijeva sveobuhvatan pristup, počevši od narudžbe broda i projektiranja postrojenja pa sve do eksploatacije i tretmana ukrcanoga goriva.

Loše rukovanje sustavom goriva ima dalekosežne posljedice na pogonski motor i brzinu broda, ali i izravne posljedice na sva pomoćna brodska postrojenja, ponajviše na ispušne kotlove.

Neizravne su posljedice povećani troškovi remonta, koji su brodari prisiljeni obavljati prije očekivanoga roka.

LITERATURA / References

1. Prof. dr. sc. Milić, L., *Brodski motori I.*, Dubrovnik 2009.
2. MAN B&W S46MC-C7, *Project Guide*, 2009
3. How it works, www.alfa.laval.com
4. <http://www.wartsila.com>
5. MAN B&W Diesel A/S, service letter, june 2002
6. http://www.vaf.nl/products/technical_manuals.asp / VAF, product bulletin 770, 753.
7. Chevron, Everything you need to now about the fuel, 2008

Rukopis primljen: 10. 11. 2010.