

# Analiza korozijskog djelovanja u cilindru brodskoga sporohodnoga dvotaktnog dizelskog motora

## Large Bore Low Speed Marine Diesel Engine Cylinder Corrosion Action Analysis

Branko Lalić

student  
Pomorski fakultet u Splitu  
e-mail: blalic@pfst.hr

Maja Kliškić

Kemijsko tehnološki fakultet  
Sveučilište u Splitu  
e-mail: kliskic@ktf-split.hr

Ivan Komar

Pomorski fakultet  
Sveučilište u Splitu  
e-mail: ivan.komar@pfst.hr

UDK 629.5:621.436

Pregledni članak / Review

Rukopis primljen / Paper accepted: 12. 11. 2012.

### Sažetak

Današnji trend u razvoju pomorstva i tehnologije općenito, a samim time i pritisci brodarada, nagnali su proizvođače velikih brodskih dvotaktnih sporohodnih dizelskih motora da konstrukcijskim modifikacijama omogućе uporabu goriva sve lošije kvalitete. Takva goriva sadržavaju tvari koje u određenim uvjetima mogu postati vrlo korozivne. Danas se, generalno gledajući, za pogon trgovačkih brodova koristi sporohodnim dvotaktnim dizelskim motorima u rasponu snaga od 5,000 do 80,000 kW i to na goriva vrlo loše kvalitete. Izgaranje takvih goriva u cilindrima motora neminovno uzrokuje stvaranje elektrokemijske i kemijske korozije, te trenje i trošenje elemenata cilindra i ispušnih vodova. U ovom će se radu analizirati problem nastanka korozije i zaštita kojom se danas služi poradi sprečavanja korozijskog djelovanja u cilindrima velikih brodskih dvotaktnih sporohodnih dizelskih motora.<sup>1</sup>

### Summary

*Current trends in the development of maritime transport and technology in general, and the ship owners' pressures themselves, have forced the producers of large marine two-stroke low-speed diesel engines (by means of the structural modifications) to use low quality fuels oils. These fuels contain substances which under certain conditions can become very corrosive. Today, generally speaking, for the propulsion of merchant ships the use of low speed two-stroke diesel engines in the power range between 5.000 and 80.000 kW, which use very poor quality fuel oil. Combustion of these fuels in the engine cylinders inevitably leads to the formation of electrochemical and dry corrosion, friction and wearing of cylinder elements and exhaust pipes. This paper will analyze the emergence of corrosion and the protection used today against the effects of corrosion in the cylinders of large marine two-stroke low-speed diesel engines.*

### KLJUČNE RIJEČI

cilindar brodskoga dizelskog motora  
elektrokemijska korozija  
kemijska korozija  
trenje  
trošenje

### KEY WORDS

Marine Diesel Engine Cylinder  
Electrochemical Corrosion  
Dry Corrosion  
Friction  
Wear  
Tear

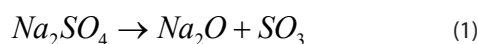
### UVOD / Introduction

Korozijski se procesi mogu podijeliti prema mehanizmu procesa korozije i s obzirom na njezin pojavni oblik. Korozija nastaje i kod metalnih i kod nemetalnih konstrukcijskih materijala, pa se koristi i podjelom na koroziju metala i koroziju nemetala. Kako su u današnjoj pomorskoj industriji metali osnovni materijali, potrebno je posebnu pozornost posvetiti korozijskom ponašanju upravo njih. Prema mehanizmu procesa korozije na elementima cilindra brodskih sporohodnih dvotaktnih dizelskih motora, razlikuje se kemijska i elektrokemijska korozija. S obzirom na pojavni oblik, korozija može biti opća, lokalna, selektivna i interkristalna.

### KEMIJSKA KOROZIJA / Dry Corrosion

Kemijska korozija ubrzani je oblik korozije u kojemu taline soli formiraju film na površini metala i on topi, uništava ili probija normalni zaštitni oksidni sloj. Takve taline obično tvore spojevi sumpora, natrija i vanadija. U teškim gorivima oni su sadržani

u sljedećim količinama: natrij do maks. 100 mg/kg, vanadij do maks. 350 mg/kg, sumpor do maks. 3,5% masenog udjela, ali količina sumpora u gorivu izravno podliježe regulativi zemlje u kojoj se brod nalazi [1]. Tijekom procesa izgaranja nečistoće - sumpor, natrij i vanadij tale se ili isparuju, pa se zatim talože na metalnim dijelovima pri temperaturama nižima od temperature kondenzacije pojedinog elementa. Kemijsku koroziju redovito pokreće sumpor, a među produktima izgaranja on je obično zastupljen kao natrijev sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), pa se pri visokim temperaturama disocira prema sljedećoj reakciji:



U tipičnoj kemijskoj reakciji, rastaljeni natrijev sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) djeluje na zaštitni oksidni sloj metala, probija ga i dovodi do njegova trošenja. Natrijev sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) inducira korozijski proces koji uključuje proboj taline i sulfidaciju.

Vanadij, također kao nečistoća u teškom gorivu, uzrokuje korozijske problem zbog formiranja vanadijeva pentoksida ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) koji ima talište na 670 °C. Problem nastaje ako je tu i natrij jer neki oksidi na bazi vanadija i natrija imaju još nižu temperaturu tališta, npr. natrij-vanadij-vanadat (eng. Sodium

<sup>1</sup> Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenog projekta „Nove tehnologije u dijagnostici i upravljanju brodskih porivnih sustava“, provedenoga uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske [13].

vanadic vanadate)  $5Na_2O \cdot V_2O_5 \cdot 11V_2O_5$ , ima talište na 535 °C [3]. U kombinaciji sa sumporom, oni su u stanju tvoriti različite oblike natrij-vanadij-vanadata. Neki od tih spojeva imaju vrlo nisku temperaturu tališta, i to uvelike utječe na brzinu kemijske korozije, što je vidljivo i iz tablice 1.

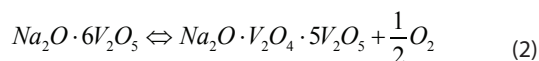
Tablica 1. Temperatura tališta različitih natrij-vanadij-vanadat spojeva [6]

Table 1 Temperature of melting points of different natrium-vanadat compounds [6]

Kemijski sastav	Talište (°C)
$V_2O_5$	670
$Na_2O \cdot V_2O_5$	682
$2Na_2O \cdot V_2O_5$	643
$Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot 5V_2O_5$	535
$5Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot 11V_2O_5$	535
$Na_2SO_4$	887

Ponašanje tih spojeva u uvjetima taljenja osobito su važni. Primjer:

→ *kristalizacija*



← *taljenje*

Pritom se pokazuje da se oslobađanje atoma kisika odvija u trenutku taloženja, što dovodi do djelovanja kisika na metalnu površinu. Talina, formirana na takav način, probija zaštitni sloj oksida na površini metala, čineći osnovni metal jako ranjivim na kemijsku koroziju. Mineralne naslage pepela na sjedištima ispušnih ventila, koje zbog konstantnog otvaranja i zatvaranja ventila (efekt kovanja), stvaraju deformacije na dijelovima u kontaktu pa može doći do propuštanja vrućih ispušnih plinova (engl. *blow-by*), slika 1.a. Mineralne naslage pepela bivaju tada naglo zagrijane i rastaljene, zbog čega korozijski djeluju na pladanj ventila i sjedište (slike 1. b i c). Najprikladniji način izbjegavanja efekta „kovanja“ na dosjednim brtvećim površinama ispušnog ventila je ugradnja mehanizma za zakretanje vretena ispušnog ventila kojim se uspješno izbjegava da pladanj ispušnog ventila uvijek dosjeda na istu točku njegove brtveće površine.

Uz ispušni ventil, djelovanju kemijske korozije izložena je i kruna stapa, a štete takve vrste u praksi se još nazivaju i izgaranje čela stapa (engl. *piston crown burn off*). Specifičnost takva gubitka materijala je u tome što one nastaju korelacijom korozije i erozije [7].

**Korozija:** Kao što je već prije spomenuto, elementi sumpor (S), vanadij (V) i natrij (Na) sastavni su dio teških goriva kojima se koristi za izgaranje u velikim dvotaktnim sporohodnim brodskim motorima i zaslužuju posebnu pozornost zbog korozijskih naslaga jesu one koje uzrokuju gubitak materijala na kruni stapa. Korozijske naslage, sadržane u tankom sloju pepela koji se formirao na površini krune stapa odmah neposredno nakon upućivanja motora, neće uzrokovati nikakvu štetu ni gubitak materijala sve dok je taj zaštitni sloj cjelovit.

**Erozija:** Neki dijelovi krune stapa izloženi su eroziji nastaloj djelovanjem plinova izgaranja koji imaju veliku brzinu i turbulentno strujanje. Takvo strujanje ispušnih plinova prvenstveno je razlogom za lokalno uklanjanje zaštitnoga oksidnog sloja, čime se pojavljuje korozija i erozija uz gubitak materijala na oštećenim područjima.

Na mehanizam gubitka materijala jako utječe temperatura površine čela stapa, pa zbog relativno malog povišenja temperature nastaje znatan porast brzine korozijskog djelovanja na oštećenim područjima. Dva su osnovna modela gubitka materijala s čela stapa, i to [7]:

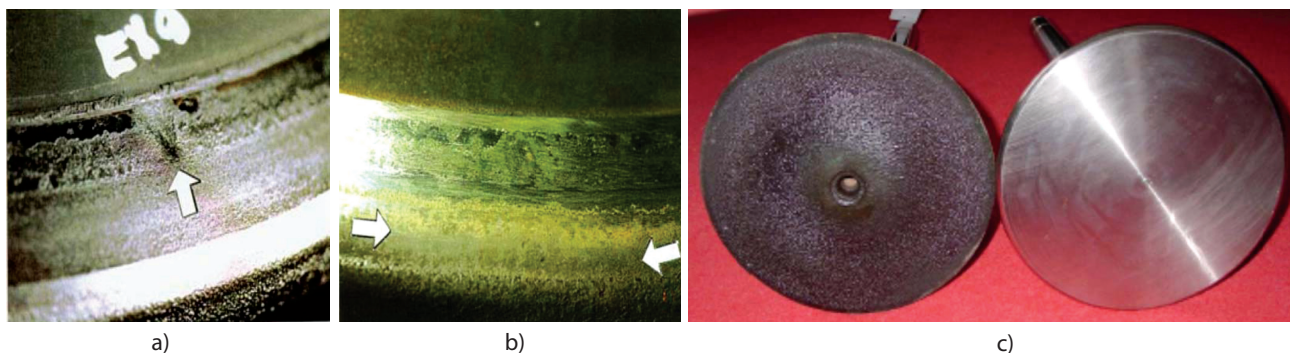
a) *Lokalni gubitak materijala u području ubrizgavanja goriva*

Lokalni gubitak materijala u području ubrizgavanja goriva iniciran je nepravilnim radom rasprskavača goriva ili nedgovarajućom sapnicom rasprskavača goriva pa se zbog toga nakuplja neizgoreno gorivo ispod rasprskavača (područje „x“, slika 4.) i njegovim kontinuiranim izgaranjem lokalno se povisuje temperatura čela stapa. Tipičan primjer lokalnog gubitka materijala zbog neispravnosti rasprskavača je na slici 4. Prevencija takva nastanka kemijske korozije i lokalnom gubitku materijala je redovita, vizualna, kontrola čela stapa i pregled i testiranje rasprskavača goriva prema uputama proizvođača.

b) *Kontinuirani gubitak materijala na čelu stapa*

Model čela stapa koji slični „kaldrimi“ ili „slonovskoj koži“ (engl. *paving stone structure / elephant skin*) i pokriva veće ili manje dijelove krune stapa prikazan je na slici 2. Takva morfologija površine na kruni stapa tipičan je primjer kemijske korozije zbog:

- nakupine naslaga vapnenca (kalcita) i karbona (mulja) na

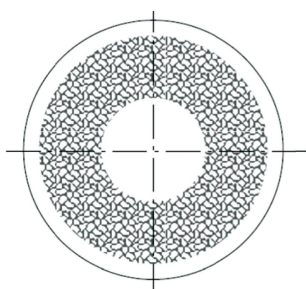


Slika 1. Djelovanje kemijske korozije na ispušni ventil [4, 5]  
Figure 1 Chemical corrosion action on exhaust gas valve [4,5]

- a) progiranje dosjednog sjedišta ispušnog ventila / *Exhaust gas valve housing seat blow-by*  
b) gubitak materijala na rubnim dijelovima pladnja ispušnog ventila (33.000 radnih sati) / *Exhaust valve spindle material loss (33000 running hours)*  
c) izgled pladnja prije reparacije postupkom navarivanja i nakon nje / *Nimalike spindle before and after remanufacturing*

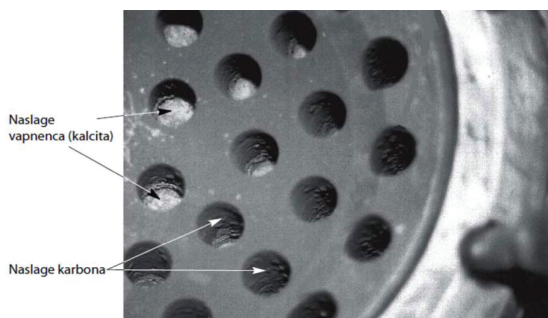
krajevima rashladnih kanala krune stapa (slika 3.), zbog neadekvatne kvalitete rashladne vode. Jedan mm spomenutih naslaga dovodi do porasta temperature krune stapa za oko 200 °C. Iniciranje kemijske korozije na takav način moguć je samo za motore kojima je hlađenje krune stapova izvedeno cirkulacijom slatke vode. Prevencija za ovakav nastanak kemijske korozije sastoji se u redovitom praćenju kvalitete rashladne vode tjednom analizom, te ispravnim doziranjem inhibitora (npr. „UNITOR Dieselguard NB“ - praškasti inhibitor na bazi nitrata/borata s organskim inhibitorima korozije) na osnovi analize i praćenjem ispravnog rada separatora rashladne vode kako bi se pravodobno i kvalitetno odstranio mulj iz sustava hlađenja. Preporučuje se i provjera sadržaja ulja u rashladnoj vodi jer ona ne smije premašiti vrijednost od 30 ppm;

- manjka ispirnog zraka zbog onečišćenja usisnog filtra, kompresora ili turbinskih lopatica turbopuhala, onečišćenja rashladnika ispirnog zraka ili onečišćenja kotla na ispušne plinove.

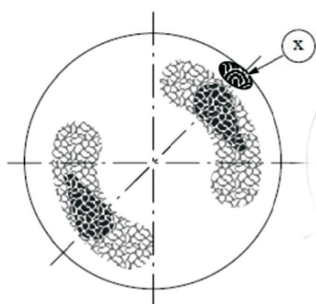


Slika 2. Model čela stapa s tzv. „kaldrmom“ ili „slonovskom kožom“ [7]

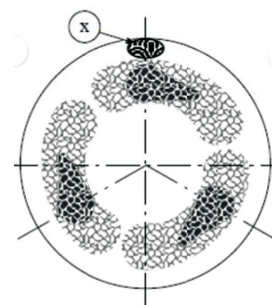
Figure 2 So called "paving stone structure" / "elephant skin" over combustion surface of the piston crown [7]



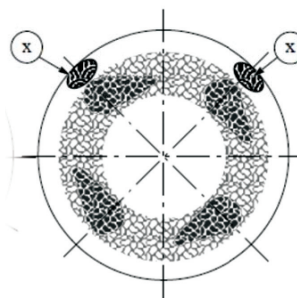
Slika 3. Naslage nečistoća u rashladnim kanalima krune stapa [7]  
Figure 3 Contamination of Cooling Bores in Piston Crown [7]



a)



b)



c)

Slika 4. Modeli čela stapa s neispravnim rasprskavačima goriva [7] ("x" nakupine neizgorenog goriva zbog neispravnosti rasprskavača )

Figure 4 Piston crown pattern due to fuel injectors poor condition or nozzle tips with incorrect specification [7]

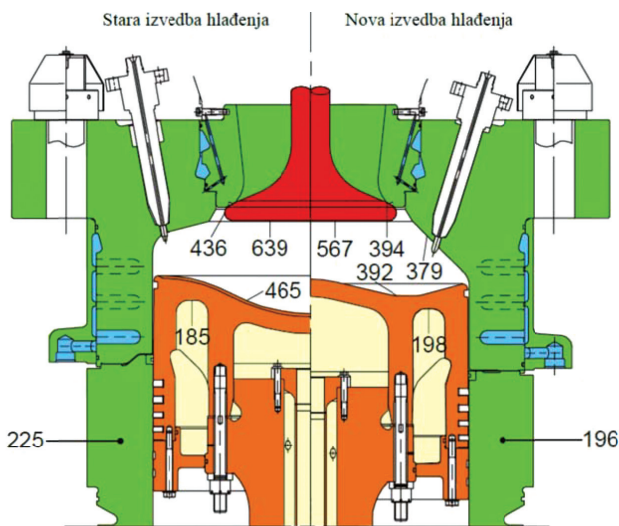
a) model čela stapa s dva neispravna rasprskavača ili s neadekvatnim sapnicama / Pattern on piston crown if both fuel injectors are in poor condition or equipped with nozzle tips with incorrect specification

b) model čela stapa s tri neispravna rasprskavača ili s neadekvatnim sapnicama / Pattern on piston crown if all three fuel injectors are in poor condition or equipped with nozzle tips with incorrect specification

c) model čela stapa s četiri neispravna rasprskavača ili s neadekvatnim sapnicama / Pattern on piston crown if all four fuel injectors are in poor condition or equipped with nozzle tips with incorrect specification

U praksi se tijekom redovitog pregleda može uočiti djelovanje kemijske korozije kao posljedica lokalnog gubitka materijala u području ubrizgavanja goriva i kao kontinuirani gubitak materijala na kruni stapa, pa tada model krune stapa poprima jedan od izgleda kao na slici 4.

Uvođenjem poboljšane cirkulacije rashladnog ulja kroz stap, tvrtka MAM B&W je na svojim motorima uspješno snizila maksimalne temperature u kompresijskom prostoru, i tako je smanjila rizik od nastajanja kemijske korozije (slika 5.) [8].



Slika 5. Sniženje maksimalnih temperatura kompresijskog prostora uvođenjem poboljšano hlađenja [8]  
 Figure 5 Lowering temperature peak inside of compression space by introducing improved cooling [8]

Ako se tijekom pregleda čela stapa, pri redovitom vađenju stapu iz cilindra motora ili tijekom redovite inspekcije kroz ispirne otvore, uoči i izmjeri povećani gubitak materijala na čelu stapa, on mora biti zamijenjen rezervnim, uz detaljnu analizu uzroka nastanka kemijske korozije. Dopusćeni se gubitak materijala kreće u granicama od 8,0 do 10,0 mm, ovisno o veličini motora. Reparirati čelo stapa smije samo autorizirani servis ili proizvođač. Ako su uzrok nastanku kemijske korozije naslage vapnenca (kalcita) i karbona (uljni mulj) na krajevima rashladnih kanala čela stapa, preporučuje se čišćenje postupkom pjeskarenja finim granulama jer kemijsko čišćenje ne donosi željene rezultate.

Uz to što su uzročnici korozijskog djelovanja vanadij, sumpor i natrij talože se na stapu i stapnim prstenima, te postaju abraziv, što uzrokuje povećano specifično trošenje cilindarske košuljice i stapnih prstena.

Uz mehaničke modifikacije komponenata motora poradi sprečavanja kemijske korozije, uvode se i novi materijali, kao korozijski otporne prevlake, npr. *Stellite 6* legura, za prevlačenje brtvećih površina pladnja ispušnog ventila, a u tablici 2. prikazan je kemijski sastav [14].

Kao materijal otporan na kemijsku koroziju, za izradbu ispušnih ventila tvrtka Wärtsilä Sulzer, jedan od vodećih proizvođača velikih brodskih dvotaktnih sporohodnih dizelskih motora, koristi se legurom *Nimonic 80A* za prevlačenje dosjeda pladnja ispušnog ventila [2], jer ona pokazuje zavidnu otpornost prema kemijskoj koroziji pri normalnim radnim temperaturama. Nominalni sastav legure *Nimonic 80A* prikazan je u tablici 3.

Tablica 2. Nominalni sastav (%) i fizikalna svojstva legure *Stellite 6* [14]  
 Table 2 Nominal content (%) and physical features of the alloy *Stellite 6* [14]

Kobalt (Co)	Krom (Cr)	Volfram (W)	Ugljik (C)	Ostali metali	Tvrdoća	Gustoća	Talište
Bazni materijal	27 - 32	4 - 6	0,9 - 1,4	Ni, Fe, Si, Mn, Mo	37 - 45 HRC 400-490 HV	8,46 gcm <sup>-3</sup>	1285 - 1395 °C

Tablica 3. Nominalni sastav (%) legure *Nimonic 80°* [15]  
 Table 3 Nominal content (%) of the alloy *Nimonic 80°* [15]

Kemijski sastav (%)		Fizikalna svojstva	
Ugljik ©	0,10 maks	tvrdoća gustoća talište	360 HV maks 8,19 gcm <sup>-3</sup> 1.320 - 1.365 °C
Krom (Cr)	18,0 - 21,0		
Silicij (Si)	1,0 maks		
Bakar (Cu)	0,2 maks		
Željezo (Fe)	3,0 maks		
Mangan (Mn)	1,0 maks		
Titan (Ti)	1,8 - 2,7		
Aluminij (Al)	1,0 - 1,8		
Kobalt (Co)	2,0 maks		
Bor (B)	0,008 maks		
Cirkonij (Zr)	0,15 maks		
Olovo (Pb)	0,0025 maks		
Sumpor (S)	0,015 maks u tragovima		
Nikal (Ni)	u tragovima		

### ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJA / *Electrochemical corrosion*

Općenito gledano, sumpor je glavni uzročnik elektrokemijskoj koroziji u cilindru brodskoga dvotaktnoga sporohodnoga dizelskog motora. U procesu izgaranja goriva u cilindru motora, sumpor izgara s kisikom u sumporni dioksid (SO<sub>2</sub>):



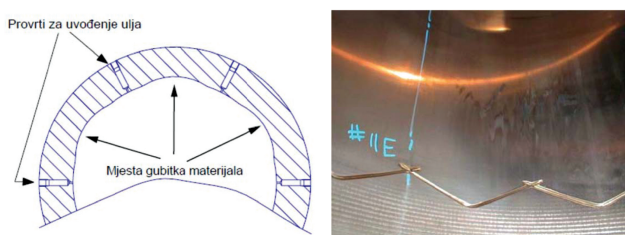
Oksidacijom sumpornog dioksida (SO<sub>2</sub>) nastaje sumpor trioksid (SO<sub>3</sub>):



Reakcija je jako egzotermna i s porastom temperature ravnoteža se pomiče nalijevo, tj. dolazi do raspada sumpor trioksida (SO<sub>3</sub>). To je razlog zašto se sumporni trioksid ne može dobiti izravnim izgaranjem sumpora. Oksidaciju sumpornog dioksida (SO<sub>2</sub>) u sumporni trioksid (SO<sub>3</sub>) ubrzava vanadijev pentoksid (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) koji se formira u teškom gorivu.

Sumporni trioksid, nastao u procesu izgaranja goriva, reagira s vlagom iz ispirnog zraka tvoreći paru sumporne kiseline i ona se, kada se temperatura površine cilindarske košuljice spusti ispod točke njezina rosišta (160 °C), kondenzira u sumpornu kiselinu (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), uzrokujući elektrokemijsku koroziju, pa nastaje korozijsko trošenje cilindarske košuljice. Na slici 6, prikazana je pozicija djelovanja elektrokemijske korozije na površini cilindarske košuljice; ono poprima oblik lista djeteline „CL“ (engl. *Clover Leaf corrosion*), pa se lako uočava na površini cilindarske košuljice, a posebno ako se zna i pozicija gdje se može očekivati. Model korozijskog trošenja cilindarske košuljice, u obliku lista djeteline, neparavilnog je oblika, ovalan ili eliptičan, ali je na više mjesta po cijelom obodu cilindarske košuljice. Pritom, proces elektrokemijske korozije koncentriran je na područje između provrta za podmazivanje ili na sjecištu kanala za razvod ulja po površini cilindarske košuljice. Glavni uzrok nastanku takva modela trošenja je nepravilno ugođena količina ulja koja se ubrizgava u cilindar, pogrešno odabrano cilindarsko ulje, tj. njegov

bazni broj, te nastanak i djelovanje sumporne kiseline ( $H_2SO_4$ ) zbog prevelike koncentracije vlage u ispirnom zraku. Na slici 6. i horizontalni je presjek cilindarske košuljice na poziciji uvođenja ulja za podmazivanje, s mjestima korozivnog djelovanja i gubitka materijala.

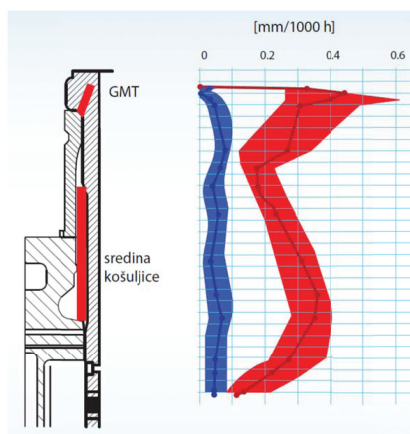


Slika 6. Pozicije gubitka materijala na cilindarskoj košuljici zbog djelovanja elektrokemijske korozije [4,8]

Figure 6 Cylinder liner typical material loss due to electrochemical corrosion action [4,8]

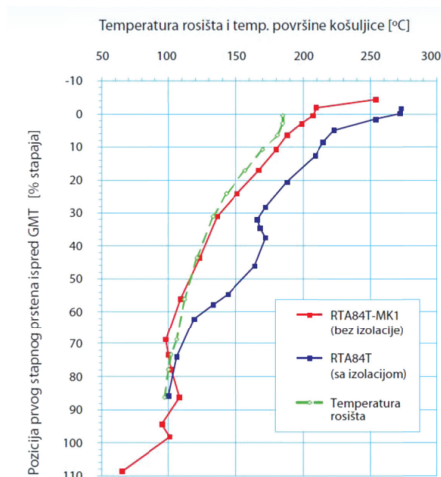
Iz naznačenoga proizlazi da je najbolja i najlakša metoda kojom se sprečava elektrokemijska korozija povišenje temperature cilindarske košuljice iznad temperature kondenzacije sumporne kiseline. Međutim, mora se imati na umu da uvijek postoji latentna opasnost da se zbog porasta temperature košuljice cilindra, kako bi se smanjila elektrokemijska korozija, može povećati djelovanje kemijske korozije. Uvođenjem dodatnih izolacija cilindarske košuljice, da bi se spriječila kondenzacija sumporne kiseline i, općenito, poboljšala tribološka svojstva materijala, uvelike je pomoglo u sprečavanju elektrokemijske korozije na cilindarskoj košuljici i stapnim prstenima [9]. Rezultati uvođenja dodatne izolacije u srednjem i gornjem dijelu cilindarske košuljice mogu se vidjeti na slikama 7. i 8.

Na slici 8. dana je usporedba vrijednosti temperature cilindarske košuljice s dodatnom izolacijom i bez nje. Za usporedbu uzeta su dva ista motora, Wärtsilä Sulzer RTA84T. Crvenom je linijom prikazana temperatura cilindarske košuljice motora RTA84T bez dodatne izolacije, pa se lako uočava da se radna temperatura košuljice preklapa s temperaturom rosišta vode, a niskotemperaturna se korozija pojavljuje na gotovo čitavom stapaju. Plavom je crtom prikazana temperatura cilindarske košuljice motora RTA84T s dodatnom izolacijom u dijelu GMT i sredini stapaja, pa je vidljivo da radna temperatura košuljice znatno odstupa od temperature rosišta, što dovodi do specifičnog trošenja manjega od 0,05 mm/1.000 radnih sati.



Slika 7. Pozicija dodatne izolacije cilindarske košuljice i njene prednosti [9]

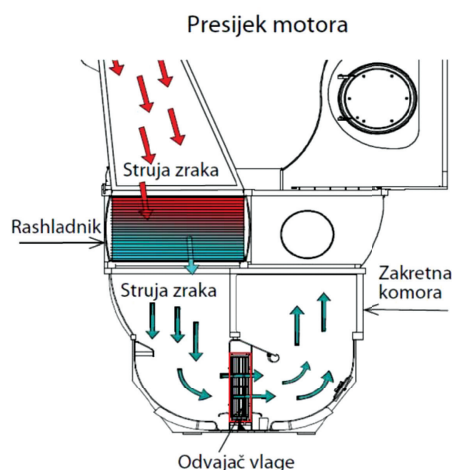
Figure 7 Cylinder liner insulation / temperature control [9]



Slika 8. Optimizacija temperature cilindarske košuljice [9]

Figure 8 Optimized cylinder liner temperature [9]

Jednako tako se, kao mjera da se smanji količina sumporne kiseline, primjenjuje i metoda smanjenja količine vlažnosti ispirnog zraka, i to tako da se ugrađuju odvajачi vlage iz ispirnog zraka na poziciji neposredno na izlasku ispirnog zraka iz rashladnika, ali također i kao zaštita protiv prekida uljnog filma na cilindarskoj košuljici zbog utjecaja vode (slika 9.) [10].



Slika 9. Pozicija odvajачa vlage iz ispirnog zraka [10]  
Figure 9 Installation of scavenging air water mist catcher [10]

Pritom, mogla bi se temperatura ispirnog zraka održavati iznad temperature rosišta, ali bi tada prednabijanje motora, pa tako i njegove radne karakteristike, bile znatno smanjene zbog smanjenja količine ispirnog zraka zbog povišenja njegove temperature. Uporaba odvajачa vlage iz ispirnog zraka danas je najraširenija metoda za snižavanje temperature ispirnog zraka i uklanjanje vlage. Sniženje je temperature ispirnog zraka rezultira boljim prednabijanjem i radnim karakteristikama motora. Očito je da se snižujući temperaturu ispirnog zraka poboljšavaju radne karakteristike motoru, ali se i povećava količina kondenzata, što, naravno, uvelike ovisi o području plovidbe broda. Uz to je očito i da je odvodnjavanje rashladnika zraka fiksno i da se ne može mijenjati, dakle ni povećati kapacitet. Samo od sebe nameće se pitanje koliko se smije snižavati temperatura ispirnog zraka. U ovakvim graničnim slučajevima, preporučuje se održavati temperaturu ispirnog zraka dostatno visokom, a da pritom ipak „proizvodnja“ kondenzata bude nešto ispod maksimalnog

kapaciteta cjevovoda za odvodnjavanje. Dakle, temperatura se ispornog zraka treba održavati u granicama normalnog režima rada motora (25 – 47 °C). Nomogram na slici 10., prikazuje koliko vlage može sadržavati zrak u strojarnici (ambijent motora) i isporni zrak da bi parametri (temperatura ispornog zraka) bili u granicama normalnog režima rada motora.

Uporaba nomograma, određivanje temperature ispornog zraka i izračun količine kondenzirane vode dani su u sljedećem primjeru, a očitavanje vrijednosti mogu se pratiti na na samom nomogramu [11].

Primjer

Neka budu očitani sljedeći parametri:

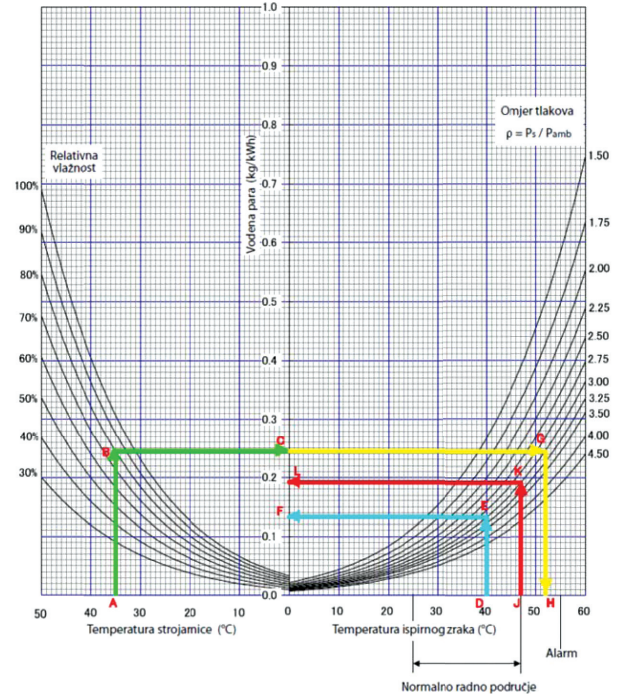
- Snaga glavnog motora,  $N_e$ : = 8.000 kW
- Temperatura zraka strojarnice,  $T_a$ : = 35 °C
- Relativna vlažnost zraka u strojarnici,  $H_a$ : = 80%
- Omjer tlakova,  $\rho$ : = 3,0 (tlak ispornog zraka 0,2 MPa)
- Temperatura ispornog zraka,  $T_s$ : = 40 °C
- Normalni raspon temp. ispornog zraka,  $T_{sn}$ : = 25 - 47 °C
- Gornja dopuštena temp. ispornog zraka,  $T_{sh}$ : = 55 °C
- Vlaga sadržana u zraku strojarnice,  $Y_1$ : = očitava se na nomogramu, u [kg/kWh]
- Vlaga sadržana u ispornom zraku,  $Y_2$ : = očitava se na nomogramu, u [kg/kWh]
- Količina kondenzata,  $G_w$ : =  $N_e \cdot (Y_1 - Y_2)$  [kg/h ili l/h]

1. Količina vodene pare u zraku strojarnice,  $Y_1 = 0,245$ , točka „C“, može biti očitana s osi y vodene pare (svjetlozelena crta), ako se horizontalna crta povuče iz točke „B“ na os x (križanje vrijednosti relativne vlažnosti od 80% i temperature zraka strojarnice od 35 °C, točka „A“).
2. Količina vodene pare u ispornom zraku,  $Y_2 = 0,13$ , točka „F“, može biti očitana s osi y vodene pare (svjetloplava crta) ako se horizontalna linija povuče iz točke „E“ na os x (križanje vrijednosti omjera tlakova  $\rho = 3,0$  bara, i temperature ispornog zraka od 40 °C, točka „D“).
3. Količina kondenzirane vode iznosi:
 
$$G_w = 8.000 \cdot (0,245 - 0,13) = 920 \text{ [kg/h]}$$
4. Kondenzat se „ne proizvodi“ kada je  $Y_1$  jednak ili manji od  $Y_2$ . U ovom primjeru, temperature ispornog zraka od 52 °C, točka „H“, očitana na osi x (žuta crta), sjecište okomice povučene iz točke „G“, koja predstavlja sjecište pravca povučenoga iz točke „C“ i krivulje omjera tlakova  $\rho=3,0$ , predstavlja točku rosišta ako je  $Y_1$  jednak ili manji od  $Y_2$ .
5. Ako se temperatura ispornog zraka održava na 47 °C, što je maksimalno dopuštena temperatura ispornog zraka pri normalnom režimu rada motora, količina kondenzata može biti očitana kako slijedi:
6. Količina vodene pare u ispornom zraku,  $Y_2 = 0,19$ , točka „L“, može biti očitana ako se iz točke „J“, a koja označava

maksimalno dopuštene temperature ispornog zraka pri normalnom režimu rada motora, povuče okomica na krivulju omjera tlakova  $\rho=3,0$ , točka „K“, te se zatim iz ove točke povuče vodoravna crta na vertikalnu os količine vodene pare, y, točka „L“ (crvena crta).

7. Količina kondenzirane vode iznosi:

$$G_w = 8.000 \cdot (0,245 - 0,19) = 440 \text{ [kg/h]}$$



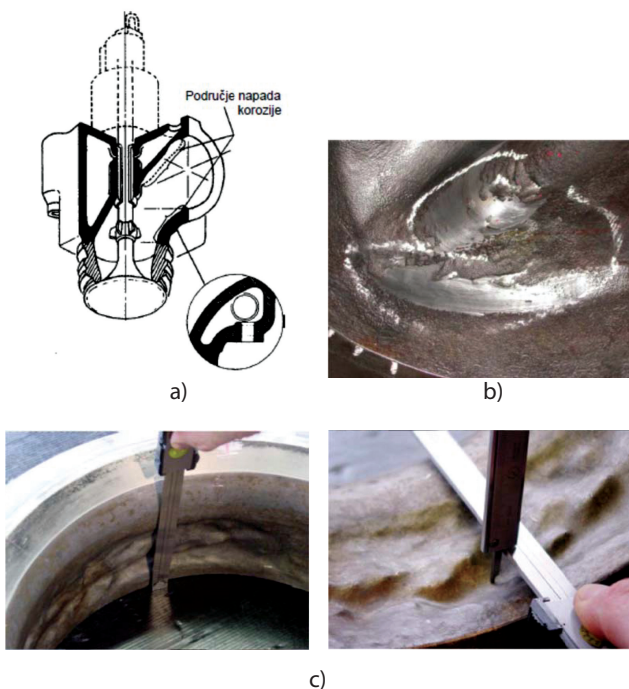
Slika 10. Nomogram za određivanje odnosa sadržaja vlage u zraku ambijenta i u ispornom zraku [11]

Figure 10 Water vapor amount of intake air/scavenge air [11]

Ispušni ventil kao specifičan strojni element, podložan je djelovanju i kemijske i elektrokemijske korozije. Elektrokemijska korozija, koja se odvija na dimnoj strani kućišta ispušnog ventila, znatno skraćuje vrijeme između tvornički predviđenog termina održavanja ventila, TBO (engl. **Time Between Overhauling**), a pogotovo u velikim brodskim dvotaktnim sporohodnim motorima (misli se na motore s promjerom cilindarske košuljice većim od 600 mm). Korozijski proces očituje se na dijelu kućišta vodilice vretena ventila i na području dimovoda na poziciji ulaza rashladne vode u kućište ispušnog ventila (slika 11.) [2].

Rješenje se problema našlo u novom dizajnu kućišta, (slika 12.), koje ima deblje stijenke dimovoda. Za one motore koji su već u eksploataciji, kada brodari važu svaki trošak kako bi se održali na svjetskom tržištu, proizvođači motora predlažu sljedeća rješenja [2]:

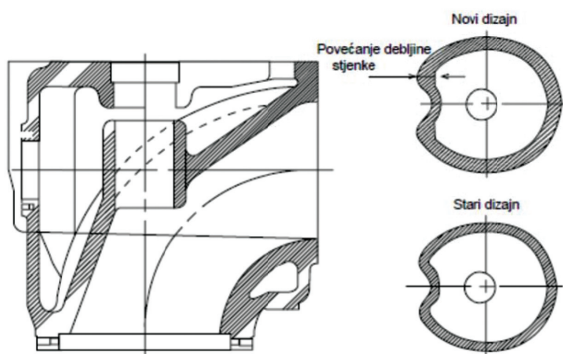
- nanošenje „Diamalloy 1005 (Ni 21,5Cr 8,5Mo 3Fe 0,5Co)“ materijala postupkom naštrcavanja, pri velikim brzinama, na područja dimovoda ispušnog ventila gdje je uočen gubitak materijala,
- navarivanje postupkom MIG.



Slika 11. Prikaz područja djelovanja elektrokemijske korozije na ispušni ventil [2,5]

Figure 11 Exhaust valve housing, indicating where corrosion problems were encountered:

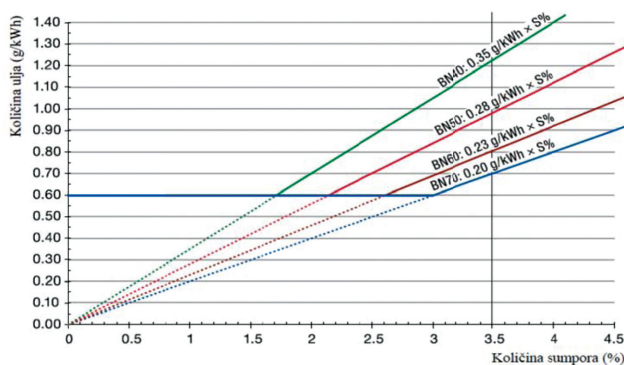
- a) područja djelovanja elektrokemijske korozije na ispušni ventil / Exhaust valve housing, indicating where corrosion problems were encountered and remedied,  
 b) gubitak materijala zbog djelovanja elektrokemijske korozije na kućište ispušnog ventila / Low temperature corrosion of exhaust valve housing,  
 c) gubitak materijala zbog djelovanja elektrokemijske korozije na dosjednu bazu ispušnog ventila / Low temperature corrosion of bottom piece.



Slika 12. Novi dizajn kućišta ispušnog ventila [5]  
 Figure 12 Exhaust valve housing new design [5]

Još jedan uspješan način da se suzbije problem sumporne kiseline i elektrokemijske korozije povećanje je baznog broja (BN) ulja za podmazivanje cilindarskih košuljica, tj. povećanje sposobnosti neutralizacije kiseline [12]. Prateći problem vode u cilindru, te neutralizaciju sumporne kiseline na stijenkama cilindarske košuljice motora, a naravno i cijenu cilindarskog ulja, izravno povezanu s baznim brojem, sam od sebe nameće se zaključak: količina kiseline koju treba neutralizirati ovisi o količini kondenzata, a opet količina kondenzata ovisi o temperaturi stijenke cilindarske košuljice! Ovisnost količine sumpora iz goriva i količine ulja za podmazivanje cilindarske

košuljice i stapnih prstena, s različitim baznim brojevima (BN), prikazana je dijagramom na slici 13.



Slika 13. Dijagram za određivanje količine ulja na osnovi vrste ulja za podmazivanje cil.košuljice [12]

Figure 13 Recommended cylinder lubrication feed rate as a function of the fuel oil sulphur content for selected lubricating oils [12]

Funkcija cilindarskog ulja očituje se u sljedećem [4]:

1. Omogućuje hidrodinamično podmazivanje, tj. osigurava odvajanje radnih površina cilindarske košuljice i stapnih prstena.

Količina cilindarskog ulja koja je potrebna da se stvori uljni film uglavnom je neovisna o kvaliteti goriva trenutno u uporabi, a dostatna količina ulja za podmazivanje što je propisuje proizvođač utvrđuje se pregledom radne površine cilindarske košuljice i stapnih prstena kroz ispirne kanale.

2. Čisti, tj. ispire stapne prstene, njihove kanale i prostor između kanala na stapu.

Ispiranje stapnih prstena, kanala i prostora između kanala na stapu od iznimne je važnosti, i prije svega ovisi o svojstvu detergentnosti ulja (deterdžentni aditivi). Sva cilindarska ulja renomiranih proizvođača (Shell, BP, Castrol, Shevron, Total i dr.) danas u uporabi, zadovoljavaju to svojstvo, pa čak i ako je količina ulja za podmazivanje vrlo mala (min 0,6 g/kWh).

3. Kontrolira elektrokemijsku koroziju, tj. neutralizira sumpornu kiselinu  $H_2SO_4$ .

U procesu izgaranja stvara se agresivna sumporna kiselina i količina joj ovisi o količini sumpora u gorivu. Stoga je potrebno odabrati cilindarska ulja koja se mogu nositi s ovim problemom. Poradi postizanja dobrih radnih svojstava svih elemenata u cilindru motora potrebno je osigurati i neprekinutost uljnog filma, pa se u tu svrhu moraju zadovoljiti sljedeći uvjeti:

- vrijeme ubrizgavanja cilindarskog ulja mora biti pravovremeno,
- vrsta i bazni broj BN cilindarskog ulja moraju biti u skladu s karakteristikama goriva koje je u uporabi.

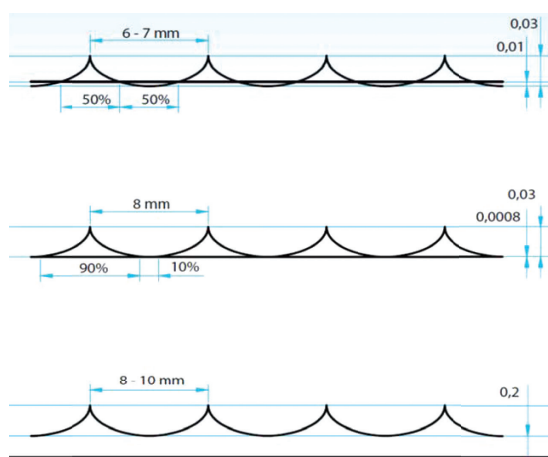
Preporučuju se cilindarska ulja viskoziteta SAE50 i baznog broja BN70 za već uhodan motor, a poželjna je uporaba cilindarskog ulja s BN80 ako je gorivo s većim sadržajem sumpora. Pri uhadavanju na probnom stolu ili za vrijeme uhadavanja na probnoj vožnji i nakon nje, preporučuju se cilindarska ulja s povećanim svojstvom detergentnosti.

Nameće se pitanje kako zadržati dostatnu količinu cilindarskog ulja na površini košuljice cilindra ako stapni prsteni klize po njoj nejednolikom brzinom, pa se ne može osigurati konstantno hidrodinamično podmazivanje, a samim time ni neutralizacija sumporne kiseline po čitavoj površini. Naime, kako se stapni prsteni približavaju gornjoj ili donjoj mrtvoj točki, zbog promjene smjera gibanja brzina im se smanjuje s

maksimalne od oko  $9,0 \text{ ms}^{-1}$  na  $0 \text{ ms}^{-1}$ . Pri malim brzinama gibanja hidrodinamično podmazivanje prelazi u elastohidrodinamičko, pa se stapni prsteni tada, u odnosu prema uljnom filmu ponašaju kao strugači, te ga uklanjaju s površine cilindarske košuljice, što znači da se formirana sumporna kiselina ne može neutralizirati jer je nedostatna količina ulja. Potrebno je napomenuti da nije isplativo povećati količinu ulja za podmazivanje kako bi se riješio nastali problem. Rješenje se pronašlo u završnoj obradi površine cilindarske košuljice.

Većina strojno obrađenih površina ima površinsku hrapavost raspoređenu približno Gausovom razdiobom. Višestruke su površinske završne obrade puno važnije od jednocesnih, gledano s funkcionalne točke gledišta. Završna obrada tipa *Plateau honed* tipična je dvoprocesna završna obrada jer nastaje primjenom dvaju procesa, klasičnoga ili grubog poravnavanja (*Coarse honing*) i završnoga ili finog poravnavanja (*Plateau honing*). Poznato je da se završnom obradom poravnavanja površine (*Honing*) dobiva površinska hrapavost po Gausovoj raspodjeli. Primjenom dvoprocesne površinske obrade, tj. ako se primijeni grubo, a zatim fino poravnanje, nastat će preklapanje Gausovih razdioba hrapavosti površina jedne preko druge, pa će površina tako obrađene cilindarske košuljice imati karakteristike otporne na trošenje, ali i veliku površinsku nosivost a obradom nastale neravnine služe kao uljni džepovi i sakupljači strugotina.

Na slici 14. tri su različite vrste završne obrade postupkom honovanja.



Slika 14. Završne obrade cilindarske košuljice postupkom honovanja [16]

Figure 14 Cylinder liner machining by honing method [16]

## ZAKLJUČAK / Conclusion

U radu se analiziralo kemijsko i elektrokemijsko korozijsko djelovanje u radnom cilindru sporohodnoga dvotaktnoga brodskog dizelskog motora. Kemijsku koroziju redovito pokreće sumpor u produktima izgaranja obično kao rastaljeni natrijev sulfat, koji inducira korozijski proces i oštećuje izložene površine u radnom cilindru motora. Vanadij, kao nečistoća iz teškoga goriva, uzrokuje trošenje zbog formiranja vanadijeva pentoksida, pa on, u kombinaciji sa sumporom, tvori različite oblike natrij-vanadij-vanadata. Neki od tih spojeva imaju vrlo nisku temperaturu tališta što pospješuje brzinu kemijske korozije i njome se gubi materijal na površinama u radnom cilindru motora izloženima visokim temperaturama u korelaciji s korozijom i erozijom. Uz korozijsko djelovanje, vanadij, sumpor i natrij i abrazivno djeluju taloženjem

na stapu i stapnim prstenima, povećavajući specifično trošenje cilindarske košuljice i stapnih prstena. Nadalje, sumporni trioksid, nastao u procesu izgaranja goriva, reagira s vlagom iz ispirog zraka i tvori paru sumporne kiseline pa se ona kondenzira u sumpornu kiselinu izazivajući elektrokemijsku koroziju u cilindru motora. Znatno smanjenje djelovanja kemijske korozije rješava se aplikacijom legure „Nimonic 80A“ na dosjedne površine pladnja i sjedišta ispušnog ventila, dok se efekt djelovanja elektrokemijske korozije smanjuje novim dizajnom kućišta uz primjenu legure „Diamalloy 1005“ u području dimovoda ispušnog ventila. Na mehanizam gubitka materijala korozijskim djelovanjem, na kruni stapa velik utjecaj ima temperatura na njezinoj površini, pa se zbog relativno malog porasta temperature znatno povećava brzina korozije i gubitka materijala na površini stapne krune. Rješenje tog problema za stapove hladene uljem je u poboljšanoj cirkulaciji rashladnog ulja u kruni stapa ugradnjom većeg broja sapnica rashladnog ulja pa se time snižavaju maksimalne temperature u kompresijskom prostoru. Sumpor i vlaga iz ispirog zraka glavni su uzročnici elektrokemijske korozije na radnoj površini košuljice cilindra. Sumporni trioksid nastao u procesu izgaranja goriva, s vlagom iz ispirog zraka prelazi u paru sumporne kiseline a ona se kondenzira u sumpornu kiselinu, presudnu za elektrokemijsku koroziju. To se sprečava povišenjem temperature cilindarske košuljice iznad temperature rosišta sumporne kiseline uz pomoć dodatne izolacije u predjelu GMT i sredine stapaja, što smanjuje specifično trošenje košuljice (manje od  $0,05 \text{ mm}/1.000$  radnih sati). S tehnološkog aspekta, da bi se smanjila elektrokemijska korozija i zadržavale dostatne količine ulja na stijenama košuljice cilindra, provodi se dvoprocesna površinska obrada klasičnim ili grubim i završnim ili finim poravnavanjem. Površina tako obrađene cilindarske košuljice bit će otporna na trošenje uz veliku površinsku nosivost, a obradom nastale neravnine poslužit će kao uljni džepovi i sakupljači strugotina. Analizirane tehnologije zaštite od korozije polazište su za dijagnosticiranje stanja u složenom sustavu cilindra velikoga brodskoga sporohodnog dizelskog motora.

## LITERATURA / References

- [1] ..... „International Standard ISO 8217 Petroleum products - Fuels (class F) - Specifications of marine fuels; 4th edition“, ISO, 15. 6. 2010.
- [2] D. Woodward, „Pounder’s Marine Diesel Engines and Gas Turbines“, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2009
- [3] G.Y. Lai, „High-Temperature Corrosion and Materials Applications“, ASM Int., Materials Park, OH, USA, 2007
- [4] ..... „VOLUME I OPERATION MANUAL“, MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, 2008
- [5] H. Fellmann, T. Groß, T. Ludwig, „Typical wear mechanism of 2-stroke exhaust valves“, Märkisches Werk GmbH, Halver, Germany
- [6] P. Pereira, „Overcoming High-Temperature Corrosion“, CIMAC Paper, 2001
- [7] ..... „Service Bulletin RTA-26: Loss of Material on Piston Crowns due to High Temperature Corrosion and Erosion“, New Sulzer Diesel, 1998
- [8] ..... „Cylinder condition“, MAN Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2006
- [9] ..... „The TriboPack for Sulzer RTA engines“, Wärtsilä Sulzer, 2009
- [10] ..... „Service Experience MAN B&W Low Speed Diesel Engines“, MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, June 2010
- [11] ..... „Service news HSD-B11103: Condensed water in scavenge air system“, HITACHI-MAN B&W Diesel Engine Service Data, May 2011
- [12] ..... „Service letter SL09-507/HRR: Guiding ACC Feed Rates for Alpha Lubricator and ME Lube“, MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, 2009
- [13] Projekt br. 250-2502209-2364, „Nove tehnologije u dijagnostici i upravljanju brodskih porivnih sustava“, Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske, 2013.
- [14] <http://www.stellite.com>
- [15] <http://www.specialmetals.com/documents/Nimonic%20alloy%2080A.pdf>
- [16] [http://www.cimac.com/PDF/CIMAC%20Circle2002/pres\\_rosgren.pdf](http://www.cimac.com/PDF/CIMAC%20Circle2002/pres_rosgren.pdf)