Dr Nikola Žegarac,
major, dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

ANALIZA TROŠENJA VITALNIH DELOVA TURBOPREHRANJIVANIH MOTORA VISOKE SPECIFIČNE SNAGE

UDC: 621.432/438.004

Rezime:

Prikazani su rezultati istraživanja trošenja vitalnih delova turboprehranjivanih motora visoke specifične snage. Istraživanja su obavljena u laboratoriji na dva motora po posebnom programu za ispitivanje motora specijalne namene.

Na osnovu kinematičke i dinamičke analize parametara motornog mehanizma, vezano za karakteristične uslove rada motora, uspostavljeni su kvalitativni odnosi opterećenje — trošenje pojedinih delova motora u laboratorijskim uslovima, u zavisnosti od ukupnog vremena rada motora.

Prognozirani su intenzitet i vid istrošenja u realnim uslovima eksploatacije motora.

Ključne reči: trošenje, turboprehranjivani motori visoke specifične snage, klip, klipnjača, kolenasto vratilo, bregasto vratilo, ležajevi motora, pogonska sigurnost, vek eksploatacije.

ANALYSIS OF VITAL PARTS WEAR IN TURBOCHARGERS WITH HIGH SPECIFIC POWER

Summary:

The results of investigation of vital parts wear in turbochargers with high specific power are presented. The investigation was carried out in a laboratory on two turbochargers using the special programme for testing special purpose engines. Based on the kinematic and dynamic analysis of engine mechanism parameters and connected with the characteristic engine operating conditions, the qualitative load to wear ratios of particular engine parts in laboratory conditions are established with respect of total operating time. Damage type and intensity in real operating conditions are predicted.

Key words: wear, turbochargers with high specific power, piston, piston rod, crankshaft, cam shaft, engine bearings, drive safety, service life.

Uvod

Prelaskom na turboprehranjivanje i njegovim brzim razvojem, kod motora visoke specifične snage dodatno su povećana opterećenja vitalnih delova (klip, klipnjača, osovinica klipa, kolenasto vratilo, bregasto vratilo, klizni

ležajevi). Opterećenja motora koja nastaju usled sagorevanja povećala su se u proseku za 30 do 40%. Povećane su i deformacije kliznih ležajeva, velike i male pesnice klipnjače, klipa i klipnjače. Povećana je savojna i ugaona deformacija kolenastog vratila, kao i neregularnost nošenja ležajeva klip-

njače i glavnih ležajeva. »Rezerve« nosivosti motornih delova bitno su se smanjile, a svaka greška počela je progresivno da se odražava na smanjenje pogonske sigurnosti i veka eksploatacije motora.

Iz navedenih razloga proizišla je potreba za istraživanjem trošenja vitalnih delova turboprehranjivanih motora visoke specifične snage. Prema programu za hiljadusatno ispitivanje vršena su istraživanja trošenja vitalnih delova motora visoke specifične snage [1, 2].

Motor je četvorotaktni, višegorivni, sa direktnim ubrizgavanjem goriva, prehranjivan pomoću turbokompresora, hlađen tečnošću, specifične snage 18,9 kW/dm³, dvanaestocilindrični, V-konstrukcije pod uglom od $\gamma = 60^\circ$. Primenjen je klipni mehanizam sa pomoćnom klipnjačom kod koga su klipnjače levog reda cilindara (gledano sa prednje strane motora) izvedene kao glavne, dok su klipnjače desnog reda cilindara pomoćne.

Glavne klipnjače su velikom pesnicom vezane za leteće rukavce kolenastog vratila, a pomoćne zglobo, preko osovinice, povezane sa velikom pesnicom glavne klipnjače.

Istraživanja su vršena na dva motora u laboratoriji po posebnom programu za ispitivanje motora specijalne namene.

Ukupno vreme rada za prvi motor bilo je 50 ciklusa ili 547 mč, a za drugi motor 59 ciklusa ili 653 mč.

Korišćene oznake:

mč	— moto čas,
KV	— kolenasto vratilo,
γ	— ugao između osa glavnog i pomoćnog cilindra,
P	— snaga,
M	— obrtni moment,
ω	— ugaona brzina kolenastog vratila,
n	— brzina obrtanja kolenastog vratila,

G_h	— satna potrošnja goriva,
g_e	— specifična potrošnja goriva,
$\underline{p_e}$	— pritisak u cilindru,
$\overline{p_e}$	— prosečni efektivni pritisak u cilindru,
α_{pu}	— ugao početka ubrizgavanja goriva,
α_{Tu}	— ugao trajanja ubrizgavanja goriva,
R	— poluprečnik kolena kolenastog vratila,
L	— dužina glavne klipnjače,
l	— dužina pomoćne klipnjače,
r	— rastojanje od ose letećeg rukavca do ose osovinice koja spaja glavnu i pomoćnu klipnjaču,
β	— ugao između ose glavne klipnjače i ose glavnog cilindra (ugao otklona glavne klipnjače),
β_p	— ugao otklona pomoćne klipnjače,
φ	— ugao zaokreta kolenastog vratila,
γ_p	— ugao između ose glavne klipnjače i pravca između ose letećeg rukavca i ose osovinice koja spaja glavnu i pomoćnu klipnjaču (pravac »r«),
$\Psi = \gamma_v - \gamma$	— razlika uglova,
S_{op}	— rastojanje spoljne mrtve tačke pomoćnog cilindra od ose kolenastog vratila,
S	— put klipa,
g	— indeks koji označava glavni cilindar,
p	— indeks koji označava pomoćni cilindar,
e	— ekscentričnost središta rukavca,
ϵ	— relativni ekscentricitet središta rukavca,

δ	— ugao koji određuje položaj spojnice središta rukavca i ležaja,
ψ	— relativan zazor ležaja,
$h_{\min}$	— minimalna debljina uljnog filma u ležaju,
F_{rg}, F_{rp}	— rezultujuća sila na osovini klipa glavnog odnosno pomoćnog cilindra,
N_g, N_p	— normalna sila koja deluje na glavni, odnosno pomoćni cilindar,
N'_p	— dodatna normalna sila u glavnom cilindru,
K_g, K_p	— sila koja deluje na glavu, odnosno pomoćnu klipnjaču,
T_g	— tangencijalna sila koja deluje u smeru kretanja rukavca klipnjače i zakreće kolenasto vratilo,
R_g	— radijalna sila koja deluje normalno na smer kretanja rukavca klipnjače i opterećuje ležajeve kolenastog vratila,
x	— koordinata napadne tačke sile K_p , mereno od središta osovinice pomoćne klipnjače do središta letećeg rukavca,

Karakteristični uslovi rada motora

Kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem uslovi rada veoma su promenljivi. Najveći uticaj na naprezanja koja se javljaju u elementima motornog mehanizma imaju:

- pritisak gasova u cilindru motora,
- inercione sile masa u pravolinijskom kretanju i rotaciji,
- torzione vibracije kolenastog i bregastih vratila motora,
- toplotno opterećenje motora.

Usled promene uslova rada motora stalno se menjaju uticajni parametri. Sa promenom uslova rada motora menja se tok i veličina pritiska gasova, čime se menja i veličina obrtnog momenta. Promena brzine obrtanja kolenastog vratila motora bitno utiče na promene veličine inercionih sila. Sa promenom uslova rada motora menja se i temperatura motora, što utiče na toplotne dilatacije, naprezanja u elementima i na čvrstoću materijala.

Ako se žele analizirati dinamička opterećenja i naprezanja u elementima motora, to je potrebno činiti pri uslovima koji su za promatrani element najnepovoljniji. Prema potrebi, analiza se provodi i pri različitim uslovima rada motora.

Na slici 1 prikazane su spoljašnje brzinske karakteristike motora visoke specifične snage, u funkciji brzine obrtanja kolenastog vratila, i to:

$$P_e = f(n), M_e = f(n), G_h = f(n), g_e = f(n).$$

Rad motora na nazivnoj efektivnoj snazi $P_{eN} = 735 \text{ kW}$ i broju obrtaja $n_N = 2000 \text{ min}^{-1}$, karakteriše delovanje vi-

Sl. 1 — Spoljašnje brzinske karakteristike motora visoke specifične snage

sokih pritisaka gasova i maksimalnih inercionih sila. Inercione sile u velikoj meri utiču na smanjenje maksimalnog pritiska na klip motora [3, 4]. Toplotno opterećenje u ovom slučaju je najveće, s obzirom na to da je najveća frekvencija procesa sagorevanja.

Rad motora na maksimalnoj brzini obrtanja kolenastog vratila $n_{\max} = 2200 \text{ min}^{-1}$, bez opterećenja $P_e = 0$ i $M_e = 0$, karakterišu velike inercione sile. Maksimalnu brzinu ograničava regulator brzine obrtanja. Pri proračunu je potrebno uzeti u obzir mogućnost prekoračenja maksimalne brzine obrtanja kolenastog vratila motora.

Rad motora sa maksimalnim obrtnim momentom $M_{\max} = 4300 \text{ Nm}$ i brzinom obrtanja $n_M = 1250 \text{ min}^{-1}$, karakterišu najveći prosečni efektivni pritisci u cilindru motora $p_{\max}$, što se može videti iz prikazane promene parametara na slici 2 [5]. Inercione sile imaju relativno malu vrednost, jer je $n_M < n_{\max}$.

Sl. 2 — Promena maksimalnog pritiska sagorevanja $p_{\max}$, ugla početka α_{pu} i trajanja ubrizgavanja α_{tu} u zavisnosti od brzine obrtanja kolenastog vratila

Visok temperaturni nivo motora za ovaj režim rada vrlo je značajan jer nepovoljno utiče na čvrstoću materijala, pa se dozvoljena naprezanja smanjuju.

Uslovi pri kojima će motor raditi zavise od njegove namene. Motori visokih specifičnih snaga često i dugo vremena rade pri najvećim opterećenjima, pa je to bio jedan od razloga da se forsira režim maksimalnog momenta na kojem su najveći maksimalni pritisci u cilindru motora.

Analiza opterećenja vitalnih delova motora

Kinematika motornog mehanizma

Analiza opterećenja vitalnih delova motora vrši se zbog toga da bi se mogli odrediti odnosi između opterećenja i trošenja delova.

Povećana mehanička i toplotna opterećenja motora, koja su izazvana turboprehranjivanjem, stvaraju niz problema, zbog čega turboprehranjivanje ima svoje limite. Najugroženiji delovi motora, posmatrajući radne uslove (pritisak ulja, zazor ležaja, opterećenje, brzina obrtanja, kvalitet ulja i ulazna temperatura ulja) i funkcionalne veličine (protok ulja, minimalna debljina uljnog filma, viskozitet ulja, temperatura ležaja) jesu klizni ležajevi klipnjače, kolenastog i bregastih vratila motora. Zbog toga će se ova problematika posebno razmatrati nakon analize kinematičkih i dinamičkih veličina motornog mehanizma.

Specifičnost klipnog mehanizma sa pomoćnom klipnjačom, prikazanog na slici 3, jeste da su zakonitosti kretanja klipa (put, brzina i ubrzanje) različiti za glavni i pomoćni cilindar motora [3].

Na ovaj način opisano je kretanje glavne i pomoćne klipnjače.

Dinamika motornog mehanizma

Zakovitosti promene sila motornog mehanizma razlikuju se za glavne i pomoćne cilindre zbog različitih kinematičkih veličina i masa pokretnih delova. Posebno su razmatrane sile glavnog i pomoćnog cilindra koje opterećuju klipove, osovinice klipa i klipnjače, a nakon toga izvršeno je njihovo superponiranje na letećim rukavcima kolenastog vratila [3].

Fazno pomeranje radnog procesa u pojedinim cilindrima motora, određeno je na osnovu sledećeg redosleda paljenja:

1G-6P-5G-2P-3G-4P-6G-1P-2G-5P-4G-3P

gde je:

G — glavni cilindar motora,

P — pomoćni cilindar motora.

Ako se položaj klipa prvog glavnog cilindra u spoljnoj mrtvoj tački

(SMTg), u početnoj fazi usisavanja, označi kao početni položaj motornog mehanizma ($\varphi = 0^\circ$), rukavci kolenastog vratila zauzimaju uglove (φ) prikazane u tabeli 1.

Tabela 1

Položaj rukavaca kolenastog vratila

Glavni cilindar	Ugao φ [°]
1	0
2	240
3	480
4	120
5	600
6	360

U istim faznim odnosima nalaze se radni procesi u pomoćnim cilindrima motora.

Sl. 3 — Model motornog mehanizma sa pomoćnom klipnjačom

Sile motornog mehanizma koje potiču od glavnog i pomoćnog cilindra prikazane su na slici 4.

Izvršen je kompletan dinamički proračun svih veličina, a rezultati pro-

računa prikazani su u radu [3]. Name-
ra je da se uspostave određeni kvali-
tativni odnosi opterećenje — trošenje
u zavisnosti od ukupnog vremena ra-
da motora.

Zbog obimnosti prikazan je samo
deo rezultata istraživanja. Tako, na
primer, u glavnom cilindru motora ja-
vlja se rezultujuća normalna sila kao
vektorski zbir normalne sile glavnog
cilindra i dodatne normalne sile koja
potiče od pomoćnog cilindra. To znači
da je motorski sklop mehanički i to-
plotno više opterećen na levoj strani
motora.

Upravo je to i razlog zbog kojeg se
može očekivati intenzivnije trošenje
klipnocilindrične grupe na levoj strani
motorskog sklopa.

Radijalne i tangencijalne sile od
glavnog i pomoćnog cilindra, koje de-
luju na rukavac kolenastog vratila, ko-
linearne su i mogu se vektorski sabra-
ti.

Kao rezultat takvog proračuna sila
koje deluju na leteći rukavac, na slici
5, prikazan je polarni dijagram optere-
ćenja letećeg rukavca kolenastog vra-
tila za režim maksimalnog momenta
motora [4]. Koordinatni sistem ima is-
hodište u osi rukavca, brzina obrtanja
 $KV\ n = 1200\ min^{-1}$, maksimalni pri-
tisak u cilindru $P_{max} = 131\ bar$, ugao
kolenastog vratila odnosi se na prvi
glavni cilindar, SMT je na $360^\circ KV$ de-
la visokog pritiska prvog glavnog ci-
lindra a aktivna sila ležaja klipnjače
je na rukavcu.

Na slici 6 prikazana je dinamička
putanja letećeg rukavca kolenastog vra-
tila na režimu maksimalne snage mo-
tora, na osnovu koje se može zaklju-
čiti kolika je ugroženost ležaja, budući
da su bitno povećana opterećenja bez
promene dimenzija ležaja [4, 7, 8]. U
ovom slučaju koordinatni sistem ima
ishodište u osi glavne klipnjače, SMT
je na $360^\circ KV$ dela visokog pritiska
prvog glavnog cilindra, ugao kolenas-
tog vratila odnosi se na prvi glavni ci-
lindar, brzina obrtanja $KV\ n = 1200\ min^{-1}$, maksimalni pritisak u cilindru

Sl. 4 — Sile na motornom mehanizmu
a — koje potiču od glavnog cilindra, b — ko-
je potiču od pomoćnog cilindra

$P_{cmax} = 131$ bar, relativni zazor ležaja $\psi = 0,6\text{‰}$, ulazna temperatura ulja $T_u = 78^\circ\text{C}$, srednja temperatura ulja $T_{sr} = 103,2^\circ\text{C}$, minimalna debljina uljnog filma $h_{min} = 4,94\text{ }\mu\text{m}$ a visina neravnina $h_r = 3\text{ }\mu\text{m}$.

Opterećenja glavnih rukavaca i ležajeva kolenastog vratila dobijena su prema postupku opisanom u radu [3]. Kod ovog tipa motora, posmatrajući konstrukcijsko rešenje i redosled paljenja, postignuto je ravnomerno opterećenje glavnih rukavaca i ležajeva. Najmanje su opterećeni krajevi kolenastog vratila (1. i 8. glavni ležaj), a najviše 5. glavni ležaj. Opterećenje 5. glavnog ležaja, pri M_{max} i P_{max} , iznosi

146 kN, odnosno 132 kN. Opterećenja ostalih glavnih ležajeva i rukavaca su u granicama, za režime M_{max} i P_{max} , od 33 do 130 kN, odnosno od 22 do 123 kN.

Glavni nedostatak metode proračuna opterećenja rukavaca i dinamičkih putanja rukavaca kolenastog vratila motora je u tome što ne obuhvata deformacije kolenastog vratila i kućišta motora i uticaje oblika ležajeva, zbog čega se mogu pojaviti bitne razlike u trošenju. Razlike u trošenju mogu biti povezane i sa rasporedom kanala i otvora za dovod ulja za podmazivanje, udaljenosti pojedinih mesta od glavnih uljnih magistrala, čistoćom

Sl. 5 — Polarni dijagram opterećenja letećeg rukavca kolenastog vratila za režim maksimalnog momenta motora

sistema za podmazivanje, kvalitetom ulja i sl. U normalnim uslovima rada može se očekivati da se najintenzivnije troše najopterećeniji delovi motora.

Rezultati istraživanja trošenja vitalnih delova motora

Prema programu istraživanja trošenja vitalnih delova motora visokih specifičnih snaga izvršeno je ispitivanje motora, a zatim tri mikrometražna merenja delova i sklopova. Prvo merenje vršeno je pri prvoj montaži (novi delovi), drugo nakon kontrolnog rada, a treće nakon garantnog rada motora.

Ispitivanje motora imalo je za cilj istraživanje trošenja, proveru kvalite-

ta izrade i verifikaciju proizvedenih delova, sklopova i agregata, definisanje zahteva za kvalitet i pouzdanost, i sl.

Rezultati dimenzionalnih merenja glavnih ležajeva i rukavaca kolenastog vratila dati su u tabeli 2, a proračunate vrednosti ukupnog zazora glavnih ležajeva u tabeli 3. Rezultati dimenzionalnih merenja ostalih vitalnih delova motora prikazani su u tabeli 4.

Povećanje opterećenja, usled turboprehranjivanja, letećih rukavaca i ležajeva nije toliko izraženo kao kod glavnih rukavaca i ležajeva kolenastog vratila motora.

Maksimalna vrednost opterećenja letećeg ležaja, na režimu maksimalnog momenta, iznosi 208 kN, a na režimu maksimalne snage 158 kN.

Sl. 6 — Dinamička putanja rukavca kolenastog vratila

Rezultati dimenzionalnih merenja glavnih ležajeva i rukavaca kolenastog vratila motora

Sklop: glavni ležajevi — kolenasto vratilo (glavni) rukavci									
			Vreme rada motora: 547 mč			Vreme rada motora: 653 mč			
			Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora	
I	Prečnik (mm)	Ležaj	$\phi 95 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ -0,00 \end{smallmatrix}$	$\phi 95,020$	$\phi 95,020$	$\phi 95,029$	$\phi 95,016$	$\phi 95,014$	$\phi 95,028$
		Gl. rukavac	$\phi 95 \begin{smallmatrix} -0,07 \\ -0,09 \end{smallmatrix}$	$\phi 94,924$	$\phi 94,921$	$\phi 94,914$	$\phi 94,928$	$\phi 94,925$	$\phi 94,925$
	Ovalnost (mm)	Ležaj	0,015	0,014	0,005	0,007	0,003	0,014	0,021
		Gl. rukavac	0,010	0,004	0,004	0,024	0,005	0,006	0,012
	Konusnost (mm)	Ležaj	0,010	0,004	0,008	0,017	0,002	0,004	0,015
		Gl. rukavac	0,010	0,004	0,006	0,016	0,006	0,014	0,007
II			Mere po crtežu	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora
Prečnik (mm)	Ležaj	$\phi 95 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ -0,00 \end{smallmatrix}$	$\phi 95,020$	$\phi 95,020$	$\phi 95,034$	$\phi 95,005$	$\phi 95,010$	$\phi 95,035$	
	Gl. rukavac	$\phi 95 \begin{smallmatrix} -0,07 \\ -0,09 \end{smallmatrix}$	$\phi 94,924$	$\phi 94,921$	$\phi 94,918$	$\phi 94,926$	$\phi 94,923$	$\phi 94,921$	
Ovalnost (mm)	Ležaj	0,015	0,012	0,009	0,018	0,009	0,008	0,005	
	Gl. rukavac	0,010	0,004	0,006	0,010	0,004	0,004	0,009	
Konusnost (mm)	Ležaj	0,010	0,002	0,005	0,05	0,003	0,002	0,005	
	Gl. rukavac	0,010	0,000	0,006	0,010	0,006	0,006	0,006	

			Vreme rada motora: 547 mč			Vreme rada motora: 653 mč		
III		Mere po crtežu	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora
Prečnik (mm)	Ležaj	$\phi 95 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ -0,00 \end{smallmatrix}$	$\phi 95,018$	$\phi 95,011$	$\phi 95,031$	$\phi 95,014$	$\phi 95,016$	$\phi 95,029$
	Gl. rukavac	$\phi 95 \begin{smallmatrix} -0,07 \\ -0,09 \end{smallmatrix}$	$\phi 94,921$	$\phi 94,921$	$\phi 94,918$	$\phi 94,927$	$\phi 94,922$	$\phi 94,924$
Ovalnost (mm)	Ležaj	0,015	0,020	0,002	0,018	0,006	0,003	0,004
	Gl. rukavac	0,010	0,004	0,004	0,013	0,003	0,005	0,010
Konusnost (mm)	Ležaj	0,010	0,003	0,002	0,008	0,003	0,006	0,004
	Gl. rukavac	0,010	0,002	0,004	0,011	0,005	0,006	0,010
IV		Mere po crtežu	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora
Prečnik (mm)	Ležaj	$\phi 95 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ -0,00 \end{smallmatrix}$	$\phi 95,020$	$\phi 95,018$	$\phi 95,037$	$\phi 95,005$	$\phi 95,009$	$\phi 95,034$
	Gl. rukavac	$\phi 95 \begin{smallmatrix} -0,07 \\ -0,09 \end{smallmatrix}$	$\phi 94,921$	$\phi 94,917$	$\phi 94,909$	$\phi 94,919$	$\phi 94,916$	$\phi 94,915$
Ovalnost (mm)	Ležaj	0,015	0,004	0,005	0,017	0,016	0,010	0,020
	Gl. rukavac	0,010	0,004	0,000	0,018	0,003	0,004	0,005
Konusnost (mm)	Ležaj	0,010	0,004	0,005	0,012	0,002	0,001	0,010
	Gl. rukavac	0,010	0,002	0,002	0,002	0,004	0,005	0,001

Vreme rada motora: 547 mč			Vreme rada motora: 653 mč		
V	Mere po crtežu	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora	Mere na novom motoru
Prečnik (mm)	Ležaj	$\phi 95 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ -0,00 \end{smallmatrix}$	$\phi 95,018$	$\phi 95,014$	$\phi 95,037$
	Gl. rukavac	$\phi 95 \begin{smallmatrix} -0,07 \\ -0,09 \end{smallmatrix}$	$\phi 94,921$	$\phi 94,922$	$\phi 94,917$
		0,015	0,018	0,008	0,021
Ovalnost (mm)	Ležaj	0,010	0,004	0,002	0,004
	Gl. rukavac	0,010	0,002	0,000	0,001
Konusnost (mm)	Ležaj	0,010	0,002	0,000	0,001
	Gl. rukavac	0,010	0,004	0,003	0,004
VI					
Prečnik (mm)	Ležaj	$\phi 95 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ -0,00 \end{smallmatrix}$	$\phi 95,015$	$\phi 95,009$	$\phi 95,036$
	Gl. rukavac	$\phi 95 \begin{smallmatrix} -0,07 \\ -0,09 \end{smallmatrix}$	$\phi 94,920$	$\phi 94,921$	$\phi 94,915$
		0,015	0,017	0,020	0,006
Ovalnost (mm)	Ležaj	0,010	0,004	0,003	0,013
	Gl. rukavac	0,010	0,001	0,003	0,003
Konusnost (mm)	Ležaj	0,010	0,004	0,006	0,007
	Gl. rukavac	0,010	0,004	0,006	0,004

		Vreme rada motora: 547 mč			Vreme rada motora: 653 mč		
		Mere po crtežu	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora
VII	Ležaj	$\phi 95 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ -0,00 \end{smallmatrix}$	$\phi 95,016$	$\phi 95,020$	$\phi 95,033$	$\phi 95,000$	$\phi 95,024$
			$\phi 94,923$	$\phi 94,923$	$\phi 94,923$	$\phi 94,922$	$\phi 94,927$
	Ležaj	0,015	0,010	0,020	0,015	0,023	0,025
			0,002	0,004	0,004	0,003	0,002
	Ležaj	0,010	0,009	0,003	0,014	0,003	0,010
			0,002	0,004	0,008	0,004	0,005
VIII	Ležaj	$\phi 95 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ -0,00 \end{smallmatrix}$	$\phi 95,018$	$\phi 95,016$	$\phi 95,024$	$\phi 95,005$	$\phi 94,994$
			$\phi 94,921$	$\phi 94,822$	$\phi 94,921$	$\phi 94,926$	$\phi 94,926$
	Ležaj	0,015	0,012	0,016	0,030	0,018	0,002
			0,002	0,002	0,002	0,002	0,005
	Ležaj	0,010	0,002	0,016	0,020	0,004	0,002
			0,003	0,002	0,001	0,003	0,004

Tabela 3

Proračunate vrednosti ukupnog zazora glavnih ležajeva

Redni broj ležaj — rukavac	Vreme rada motora: 547 mč			Vreme rada motora: 653 mč		
	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora	Mere na novom motoru	Mere nakon kontrolnog rada motora	Mere nakon garantnog rada motora
I	0,096	0,099	0,115	0,088	0,089	0,103
II	0,096	0,099	0,116	0,079	0,087	0,114
III	0,097	0,09	0,113	0,087	0,094	0,105
IV	0,091	0,10	0,12	0,086	0,093	0,119
V	0,097	0,092	0,12	0,079	0,082	0,11
VI	0,095	0,088	0,12	0,079	0,079	0,094
VII	0,093	0,097	0,11	0,078	0,08	0,097
VIII	0,098	0,194	0,103	0,079	0,077	0,068

Rezultati dimenzionalnih merjenja ostalih vitalnih delova motora

Naziv dela	Mere po crtežu	Vreme rada motora: 547 mč		Vreme rada motora: 653 mč	
		Razlika mera nakon kontrol- nog rada motora	Razlika mera nakon garantnog rada motora	Razlika mera nakon kontrol- nog rada motora	Razlika mera nakon garantnog rada motora
Leteći rukavci	Ležišta	$\phi 84,992$ $+0,030$	0,002	0,03	0,002
	Rukavci	$\phi 85$ $-0,06$ $-0,08$	0,005	0,016	0,002
Glavne klipnjače	Čaure	ϕ $+0,058$ $+0,078$	0,01	0,03	0,003
	Osovinice	$\phi 42$ $-0,011$	0,005	0,006	0,002
Pomoćne klipnjače	Čaure	$\phi 42$ $+0,058$ $+0,078$	0,01	0,027	0,01
	Osovinice	$\phi 42$ $-0,011$	0,004	0,005	0,004
Košuljice cilindra motora — desna strana motora	Košuljice gor- nji-prvi pojas	min. $\phi 149,950$	0,002	0,017	0,003
	Košuljice donji- drugi pojas	min. $\phi 149,950$	0,006	0,01	0,002
Košuljice cilindra motora — leva strana motora	Košuljice gor- nji-prvi pojas	min. $\phi 149,950$	0,006	0,009	0,007
	Košuljice donji- drugi pojas	min. $\phi 149,950$	0,012	0,011	0,012
Klip — desna strana motora	Klip na vrhu	$\phi 148,95$ $+0,05$	0,03	0,036	0,004
	Klip pri dnu	$\phi 149,40$ $-0,05$	0,02	0,03	0,003
Klip — leva strana motora	Klip na vrhu	$\phi 148,95$ $+0,05$	0,02	0,04	0,01
	Klip pri dnu	$\phi 149,40$ $-0,05$	0,01	0,03	0,008

Naziv dela		Mere po crtežu		Vreme rada motora: 547 mč		Vreme rada motora: 653 mč	
				Razlika mera nakon kontrol- nog rada motora	Razlika mera nakon garantnog rada motora	Razlika mera nakon kontrol- nog rada motora	Razlika mera nakon garantnog rada motora
Klipni prstenovi i klip	Prsten — prvi žleb — prvi	zazor 0,08—0,15		0,12	0,15	0,16	0,22
	Prsten — drugi žleb — drugi	zazor 0,08—0,15		0,11	0,15	0,16	0,22
	Prsten — treći žleb — treći	zazor 0,03 do 0,08		0,06	0,06	0,05	0,06
	Prsten — četvrti žleb — četvrti	zazor 0,03 do 0,08		0,06	0,07	0,05	0,06
Vodice ventila i usisni ventili	Vodice	+0,019 ϕ 18		0,019	0,062	0,008	0,051
	Ventili	-0,060 ϕ 18 —0,072		0,011	0,018	0,003	0,016
	Vodice	+0,019 ϕ 18		0,014	0,029	0,016	0,095
	Ventili	-0,040 ϕ 18 —0,052		0,007	0,001	0,006	0,015
Bregasta vratila i ležajevi — usis	Ležajevi	+0,050 ϕ 30 +0,020		0,005	0,009	0,06	0,05
	Rukavci	-0,065 ϕ 30 —0,098		0,01	0,009	0,03	0,08
	Ležajevi	+0,050 ϕ 30 +0,020		0,007	0,007	0,06	0,1
	Rukavci	-0,065 ϕ 30 —0,098		0,006	0,011	0,003	0,012
Bregasta vratila — tanjirić venti- la	Naleganje bre- ga (mereno po širini) na tanji- rić ventila	+0,4 16 —0,8		1,80*	0,00	2,00	0,00

*) Naleganje brega bregastog vratila na tanjirić ven tila mora da bude najmanje jednako širini 1/2 brega.

Za osovinicu bočne klipnjače ove vrednosti iznose 216 kN, odnosno 175 kN.

Na režimu $P_{\max}$ veće su inercione sile koje suprotno deluju u odnosu na sile sagorevanja u momentu maksimalnog pritiska gasova u cilindru motora, pa su ukupne rezultujuće sile na leteći ležaj i osovinicu bočne klipnjače manje.

Na osnovu rezultata merenja i proračuna pojedinih parametara može se videti intenzitet trošenja vitalnih delova motora zavisno od opterećenja, uslova rada i ukupnog vremena rada motora. Pokazalo se da su intenzivnija trošenja i deformacije svih ležajeva u odnosu na rukavce, što je u skladu sa osnovnim zahtevima ležaj — rukavac.

Analiza trošenja glavnih ležajeva i rukavaca pokazala je da ne postoji neki od njih, koji se intenzivnije troši. Moglo se očekivati najizrazitije trošenje 5. glavnog ležaja koji je najviše opterećen.

Trošenja glavnih ležajeva prilično su ravnomerna pošto je motor radio u laboratorijskim uslovima. Isključeni su uticaji okoline kao što su prašina, nečistoća vazduha i sl. Nisu se pojavile značajnije razlike u trošenju, a opterećenje motora nije moglo doći do izražaja budući da su minimalne debljine uljnog filma u ležaju, $h_{\min}$ znatno više od dozvoljenih. To se može videti na osnovu prikazane dinamičke putanje za 2. glavni ležaj (slika 7) [4]. Koordinatni sistem ima ishodište u osi ležaja, ugao kolenastog vratila odnosi se na

Sl. 7 — Dinamička putanja glavnog rukavca drugog ležaja za režim maksimalnog momenta motora

prvi glavni cilindar, SMT je na 360° kV dela visokog pritiska prvog glavnog cilindra, brzina obrtanja KV $n = 1200 \text{ min}^{-1}$, maksimalni pritisak u cilindru $p_{\text{max}} = 131 \text{ bar}$, relativni zazor ležaja $\psi = 0,63\%$, ulazna temperatura ulja $T_u = 78^\circ\text{C}$, srednja temperatura ulja $T_{\text{sr}} = 96^\circ\text{C}$, minimalna debljina uljnog filma $h_{\text{min}} = 3,37 \mu\text{m}$, a visina neravnina $h_r = 0 \mu\text{m}$.

Podjednaka trošenja 1. i 8. glavnog ležaja, u odnosu na ostale glavne ležajeve, nastala su zbog najvećih deformacija i najmanje krutosti na tim delovima kolenastog vratila motora. Na osnovu analize proračunatih ukupnih zazora i glavnih ležajeva (tabela 3) može se zaključiti da se, zbog trajnih deformacija pojedinih ležajeva i rukavaca, te vrednosti smanjuju nakon kontrolnog ili garantnog rada u odnosu na novi motor.

Sa povećanjem trošenja ležajeva smanjuje se minimalna debljina uljnog filma a rukavac je sve bliže površini ležaja [9, 10, 11] U uslovima eksploatacije, pored normalnog rada (kretanja rukavca u ležaju u uslovima mokrog trenja) postoji mogućnost da nastupi rad u uslovima graničnog, pa čak i suvog trenja. Osim toga, ovi uslovi su neizbežni prilikom startovanja i zaustavljanja motora kada će trošenje ležaja sigurno biti intenzivnije.

Ako se uporedi vreme rada motora može se uočiti da je nakon kontrolnog rada, motor koji je ukupno radio 547 mč imao nešto veća trošenja u odnosu na motor čije je ukupno vreme rada iznosilo 653 mč. Takođe, pokazalo se da je trošenje ležajeva nakon garantnog roka jednog i drugog motora bilo skoro isto, iako je drugi motor radio duže za 106 mč. S obzirom na to da su oba motora radila u približno istim uslovima, ovaj efekat trošenja mogao bi nastati zbog razlike u promenama kvaliteta motornog ulja koje nastaju tokom rada motora.

Analiza trošenja letećih ležajeva i rukavaca prvog motora pokazuje da je trošenje ravnomerno. Povećanje ukupnog zazora letećih ležajeva, nakon garantnog rada motora, koji je u vezi sa trošenjem kod prvog motora kreće se u granicama od 0,035 do 0,045 mm, a kod glavnih ležajeva to iznosi od 0,019 do 0,025 mm, što pokazuje da su veća trošenja letećih ležajeva koji su više i opterećeni. Slični odnosi dobijeni su i kod drugog motora.

Analiza trošenja klipnocilindrične grupe pokazuje da su neznatno veća istrošenja na levoj strani motorskog sklopa, zbog većeg mehaničkog i toplotnog opterećenja. Efekti trošenja više su izraženi pri vrhu klipa i košuljice nego pri dnu. Istovremeno više se troše klipni prstenovi koji su bliži vrhu klipa. Sigurno je da će ova trošenja u uslovima eksploatacije biti još više izražena.

Analiza trošenja razvodnog mehanizma sa ventilima, pokazuje da su veća trošenja izduvnih ventila i vođica u odnosu na usisne, zbog većeg toplotnog opterećenja i veće dilatacije.

Analiza trošenja bregastih vratila i njihovih ležajeva usisnih i izduvnih ventila pokazuje da ne postoje bitne razlike. Naleganje bregova na tanjiriće ventila povećava se sa vremenom rada motora. U početnom periodu rada motora ono treba da bude jednako najmanje polovini širine brega što se na ovim motorima, nakon kontrolnog i garantnog rada, znatno povećalo. To znači da vreme rada motora ide u prilog navedenom zahtevu.

Zaključak

Priprema motora za ispitivanje izvršena je prema programu za dugotrajno ispitivanje. Svi mereni parametri motora bili su u okviru propisanih granica. Tokom ispitivanja dolazilo je do otkaza i neispravnosti u radu moto-

ra po pojedinim sistemima, koje su se morale otkloniti. Otkazi i neispravnosti nisu bili vezani za trošenje vitalnih delova motora, pa u ovom radu nisu posebno razmatrani.

Analiza trošenja vitalnih delova pokazuje da motor poseduje visok stepen pouzdanosti. Utvrđeno je da nakon garantnog rada maksimalni pad snage motora iznosi 19 kW, što je malo u odnosu na maksimalno dozvoljenu granicu od 5% pri radu sa dizel-gorivom D-2.

Analizom rezultata istraživanja trošenja vitalnih delova turboprehranjivanih motora visoke specifične snage, vezano za karakteristične uslove rada motora, uspostavljeni su kvalitativni odnosi opterećenje — trošenje pojedinih delova u laboratorijskim uslovima u zavisnosti od ukupnog vremena rada motora. Rezultati istraživanja mogu se iskoristiti za prognozu intenziteta i vida istrošenja motora u uslovima eksploatacije.

Povećana mehanička i toplotna opterećenja, koja su izazvana turboprehranjivanjem motora, vezano za radne uslove (pritisak ulja, zazor ležaja, opterećenje, kvalitet ulja) i funkcionalne veličine (protok ulja, minimalna debljina uljnog filma, viskozitet ulja, temperatura ulja) stvaraju niz novih problema. Najugroženiji delovi motora postali su klizni ležajevi klipnjače, kolenastog i bregastog vratila motora.

U laboratorijskim uslovima rada pokazalo se da se glavni i leteći ležajevi izrazito ne troše. Očekivalo se da će se najviše trošiti najopterećeniji glavni ležaj kolenastog vratila motora. Uticaj opterećenja na veličinu trošenja nije mogao doći do izražaja pošto su minimalne debljine uljnog filma znatno više od dozvoljenih. Osim toga, bili su isključeni uticaji okoline (prašina, nečistoća vazduha i sl.) koji su od poseb-

nog značaja, a u realnim uslovima eksploatacije motora doći će do izražaja.

Utvrđeno je da se leteći ležajevi kolenastog vratila intenzivnije troše zbog toga što su opterećeniji od glavnih ležajeva. Maksimalna vrednost istrošenja iznosi 0,045 mm, a kod glavnih ležajeva 0,025 mm.

Analiza klipnocilindrične grupe pokazuje da je najveće trošenje cilindra u zoni klipnih prstenova kada je klip u položaju gornje mrtve tačke. Zbog većeg mehaničkog i toplotnog opterećenja motorskog sklopa na levoj strani motora dolazi do većeg trošenja. Maksimalne vrednosti trošenja košuljice cilindra motora iznose 0,049 mm, a klipa 0,070 mm. Istovremeno više se troše klipni prstenovi koji su bliži vrhu klipa. Sigurno je da će ova trošenja u uslovima eksploatacije biti još više izražena.

Analiza razvodnog mehanizma sa ventilima pokazuje da su veća trošenja izduvnih ventila i vođica u odnosu na usisne, zbog većih toplotnih opterećenja i veće dilatacije.

Analiza trošenja bregastih vratila i njihovih ležajeva usisnih i izduvnih ventila pokazuje da ne postoje bitne razlike. Sa povećanjem vremena rada motora poboljšava se naleganje bregova na tanjiriće ventila.

U realnim uslovima eksploatacije motora visokih specifičnih snaga posebnu pažnju treba posvetiti održavanju prečistača za vazduh i ulju za podmazivanje. Visokim stepenom prečišćavanja vazduha i ulja za podmazivanje smanjio bi se intenzitet trošenja svih delova motora.

Pokazalo se da na trošenje najveći uticaj imaju okolina i pravilna eksploatacija sredstva, od čega, u velikoj meri, zavisi pogonska sigurnost i vek eksploatacije motora.

Literatura:

- [1] Kulović, E. i dr.: Periodično ispitivanje turboprehranjivanih motora visokih specifičnih snaga, Izveštaj br. 29-1010, Sarajevo, 1990.
- [2] Kulović, E. i dr.: Periodično ispitivanje turboprehranjivanih motora visokih specifičnih snaga, Izveštaj br. 4120-2809-648, Sarajevo, 1991.
- [3] Trifunović, R. i dr.: Studija povećanja snage motora 12ČN 15/18 deo I i II, Mašinski fakultet, Beograd, 1981.
- [4] Černež, A. i dr.: Studija povećanja snage motora 12ČN 15/18, Izveštaj faze 7, Maribor, 1983.
- [5] Černež, A. i dr.: Studija povećanja snage motora 12ČN 15/18 deo I i II, Mašinski fakultet, Sarajevo, 1981.
- [6] Žegarac, N. i dr.: Metoda proračuna opterećenja i dinamičkih putanja rukavaca kolennastog vratila motora, IFTOMM — Vibracije rotacionih strojeva i sistema, Karlovac, 12.—14. 10. 1989., Zbornik radova, str. 171 do 182.
- [7] Černež, A. i dr.: Pogonska sigurnost ležaja pogonskog agregata za vozila, Visoka Tehniška škola, Maribor, 1984.
- [8] Černež, A. i dr.: Poškodba ležajev tlačno polnjenih dizel motorja, Visoka Tehniška škola, Maribor, 1984.
- [9] Žegarac, N.: Dijagnostika kliznih ležajeva u dizel-motoru, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1989.
- [10] Lang, O., Steinhilper, W.: Gleitlager, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1978.
- [11] Pinkus, O., Sternlicht, B.: Theory of Hydrodynamic Lubrication, Mc Graw-Hill, New York, 1961.