

TRIBOLOŠKA REŠENJA U RAZVOJU KLIPNIH MAŠINA TRIBOLOGICAL SOLUTION IN RECIPROCATING MACHINES DEVELOPMENT

Milojević S. *, Pešić R. **, Taranović D.***

REZIME

Smanjenje potrošnje goriva i emisije otrovnih i štetnih produkata sagorevanja, su osnovni ciljevi razvoja tehnologija za primenu na Motornim vozilima i njihovoj opremi. To se posebno odnosi na mere za smanjenje težine vozila i motora sa unutrašnjim sagorevanjem putem primene eko-triboloških znanja.

Prednost primene aluminijumskih konstrukcija sa aspekta specifične težine je evidentna. Problem je povišen koeficijent termičkog širenja i manja čvrstoća ovog metala, što može dovesti do pojave deformacija, i ne prihvatljivog povećanja zazora klipne mašine. Sa druge strane, generalno većina legura aluminijuma ima malu čvrstoću, kao i otpornost na habanje, tj. loše tribološke karakteristike.

Sa ciljem da se postignu tribološke karakteristike, kao i čvrstoća konstrukcija proizvedenih od legura aluminijuma najmanje slično livenom gvožđu, u okviru rada je istraživana mogućnost primene novih materijala za njihovu prevlaku. Rezultat su patentirani prototipovi aluminijumskog klipa i cilindra klipnog kompresora i motora, čije su površine modifikovane putem nanošenja prevlaka od tribo-materijala primenom plazma tehnologije u atmosferskim uslovima.

Ključne reči: klipne aluminijumске mašine, eko-tribologija, prevlake plazma postupkom

SUMMARY

Lowering fuel consumption and exhaust emissions continue to be prime targets in the development of technology applied for Motor Vehicles and their equipment. The focuses of attention are the reductions of the vehicle weight, as well as internal combustion engines, by application of eco-tribology knowledge.

The advantage of aluminum with regard to the specific weight is notable, but exist the problem because of the greater thermal expansion coefficient value, causing unacceptable deformations and higher clearances during reciprocating machine operations. From the second side, if we looking generally, most aluminum alloys have lower strength and wear resistance e.g. tribological properties.

* mr Saša Milojević, asist. Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, tiv@kg.ac.rs

** dr Radivoje Pešić, prof. Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, pesicr@kg.ac.rs

*** dr Dragan Taranović, doc. Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, tara@kg.ac.rs

According to provide the strength of aluminum alloys as well as a least such tribological properties like those of grey cast iron; we analyzed a new concept of surface modification. The results are the patented prototype of the aluminum piston and cylinder applicable inside of reciprocating compressor and engine, which surface is modified for tribo-materials and air plasma spray process.

Keywords: Reciprocating aluminum machines, Eco-tribology, Plasma spray coating

UVOD

Zbog izloženosti populacije ozbiljnim ekološkim problemima koji su posledica globalnog zagrevanja i konstantnog zagađenja okoline, Evropska Unija (EU) je postavila ambiciozne zahteve, a sa time u vezi i strategiju za smanjenje emisije ugljen dioksida (CO₂) iz vozila u drumskom saobraćaju. Da bi se emisija iz vozila kao i potrošnja goriva uokvirile do postavljenih granica, neophodna je primena novih tehnologija, što zahteva dodatna finansijska ulaganja.

Projektovanje klipnih kompresora i motora sa optimalnim performansama je zadatak mnogih istraživača postavljen od strane proizvođača rezervnih delova i opreme motornih vozila i motora. Formirani su brojni istraživački centri, i to integralno u sastavu proizvođača motora SUS, čiji je kompresor integralni deo (na primer Cummins), ili namenski u okviru firmi koje isključivo proizvode i plasiraju kompresore i rezervne delove (Knorr-Bremse, Meritor-Wabco, Bendix i dr.) [8,10].

Konkretnijim istraživanjem se bave i razvojni timovi inženjera svih profila u firmama koje namenski proizvode i isporučuju delove proizvođačima kompresora i motora SUS (na primer Federal-Mogul, Mahle [9]). To su delovi klipne grupe, košuljica cilindra i sl. Osim pouzdanosti, oni treba da zadovolje zahteve u pogledu čvrstoće i triboloških karakteristika.

Činjenica je na primer, da raspoloživi tipovi klipnih kompresora za proizvodnju komprimovanog vazduha na motornim vozilima imaju klasičnu konstrukciju, uobičajeno izrađenu od sivog liva. Težnja da se poveća efikasnost vozila smanjenjem njegove težine je navela automobilske inženjere da se usmere na intenzivniju primenu delova koji su proizvedeni od legura aluminijuma. Aluminijumski delovi, sa jedne strane predstavljaju veliko angažovanje energije u proizvodnji sirovina, a sa druge strane, ozbiljan doprinos smanjenju potrošnje goriva, zbog smanjenja mase vozila. Prednost aluminijuma sa aspekta specifične težine je evidentna, ali postoji problem povećanja koeficijenta termičkog širenja i male čvrstoće aluminijuma, što može dovesti do pojave deformacija, i povećanja projektovanih zazora pri radu klipne mašine. Zbog povećanja zazora dolazi do ustrujavanja maziva iz kućišta u potisni vod. U tom slučaju, mazivo sagoreva u pregrejanom vazduhu stvarajući čestice čađi, koje su osnovni uzrok začepljenja potisnog voda, a time i otkaza kočnog sistema na vozilu.

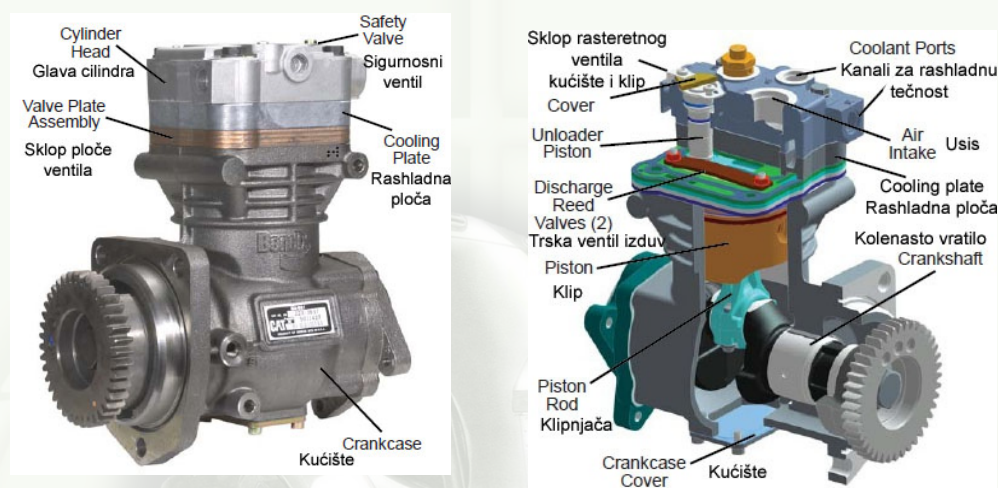
Primena triboloških znanja je tokom proteklih godina u velikoj meri doprinela tehnološkom razvoju. Zahvaljujući tribologiji, pronađena su rešenja za socijalne probleme zbog prisustva ekološki opasnih supstanci u delovima mašinske industrije. Tim putem je izbačen azbest iz delova kočnog sistema na vozilu, freon iz rashladnih sistema i sl. Mi smo u okviru rada istraživali primenu triboloških rešenja za konstrukcije klipnih mašina. Za tu svrhu smo koristili uzorke patentiranih klipova i cilindra od legure aluminijuma. Obzirom da legura aluminijuma ima malu otpornost na habanje, tj. loše tribološke karakteristike [3,7], unutrašnja površina cilindra je ojačana nanošenjem prevlaka od tribo-materijala primenom plazma tehnologije u atmosferskim uslovima. Na tako pripremljenu površinu su umetnuti i tribološki uključci grafita u obliku kontinualno raspoređenih lamela-pločica i/ ili diskretnih triboloških čepova u obliku

kuglica–nodula. Takođe, za potrebe istraživanja je konstruisan, a zatim i patentiran klip sa tribološkim umetcima [7].

SPECIFIČNOST RADA KLIPNIH KOMPRESORA ZA VAZDUH

U okviru pneumatskog kočnog sistema autobusa, teretnih vozila i traktora, klipni kompresor dobija pogon od motora sa unutrašnjim sagorevanjem i radi pri različitim brojevima obrtaja (od 1000 do 3000 min^{-1}), dok se pritisak u kočnom sistemu reguliše pomoću sigurnosnih i rasteretnih ventila. U kompresoru se ambijentalni vazduh komprimuje do pritiska od oko 0,6 do 0,8 MPa i skladišti se u rezervoarima na vozilu. U literaturi [5], je prikazano da temperatura vazduha na izdovu kompresora može da dostigne i do 400 °C, ali se primenom rashladnog sistema na vozilu, temperatura održava na oko 250 °C. Kod kompresora čiji su delovi izrađeni od legure aluminijuma, maksimalna temperatura je limitirana na 200 °C, da bi se izbegla pojava prevremenih oštećenja.

Tipičan primer konstrukcije klipnog kompresora za vazduh u kočnom sistemu teretnih vozila je prikazan na slici 1 [8]. Kompresor ima kombinovano hlađenje glave i cilindra.



Sl. 1 Klipni kompresor za vazduh kočnih sistema BENDIX® BA-921®
Fig. 1 Air reciprocating brake compressor BENDIX® BA-921®

Ciklus opterećenja klipnog kompresora se definiše kao odnos vremena aktivne isporuke komprimovanog vazduha kočnom sistemu i ukupnog vremena rada pogonskog agregata. Kompresori za vazduh se uglavnom projektuju za maksimalno 25% rada pod opterećenjem. Duži rad pod opterećenjem može dovesti do oštećenja kompresora i lošijih performansi kočnog sistema. Uzrok tome može biti dodatna upotreba komprimovanog vazduha za rad sistema na vozilu (elastično oslanjanje, aktiviranje pomoćnih uređaja i opreme i sl.), ugradnja kompresora čiji je kapacitet slabiji od potrebnog, frekventna upotreba kočnog sistema, curenje vazduha u sistemu i sl.

U slučaju preopterećenja, zbog preteranih mehaničkih i termičkih opterećenja, kompresori, najčešće otkazuju zbog gubitka funkcionalnosti ventila, slika 2 [1,6]. Zbog loše zaptivenosti

ventila dolazi do pada pritiska u cilindru i smanjenja isporuke kompresora usled isticanja komprimovanog vazduha.

U ostale uzroke otkaza klipnih kompresora možemo uvrstiti opremu pod pritiskom, klipne prstenove, loš kvalitet ulja za podmazivanje, začepljenje potisnog voda i dr.

Primenom tehnike deaktiviranja klipnog kompresora može se uticati na smanjenje parazitskih gubitaka usled opterećenja motora SUS od strane kompresora za vazduh u okviru kočnog sistema teretnih vozila i autobusa. Kompresor bi se u tom slučaju aktivirao samo u toku kočenja i na praznom hodu, što nije slučaj kod klasičnih konstrukcija. Deaktiviranje kompresora je moguće izvesti ako se u okviru sistema integriše električna spojnica.

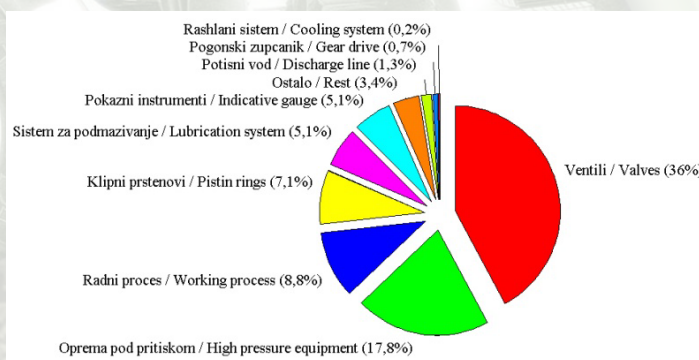
Deaktiviranjem kompresora, može se postići smanjenje emisije CO₂ za oko 6% kod autobusa, odnosno 1,5% kod kamiona dugoprugaša, gde se kočni sistem (a time i kompresor) ne koriste i do 90% od ukupnog vremena vožnje [11]. Kod gradskih autobusa se intenzivnije koristi komprimovani vazduh za potrebe kočnog i pomoćnih sistema. Kod primene na traktorima, takođe ima dosta prostora za istraživanje i postavljanje određenih zaključaka i predloga.

TRIBOLOŠKA ISTRAŽIVANJA

Od vozila se zahteva da zadovolje sve strožije propise za emisiju otrovnih i štetnih produkata sagorevanja. Tim putem, direktiva Evropske komisije 93/116/EC propisuje ukupnu emisiju CO₂ na prosečnih 130 g·km⁻¹ za sva novo proizvedena putnička vozila počevši od 2015. godine i 95 g·km⁻¹ od 2020. godine. Istovremeno, primena ulja za podmazivanje niže viskoznosti, i drugih mera za smanjenje potrošnje goriva kao što su sistemi start/stop, smanjenje radne zapremine motora i opreme, kao i tehnologije visoko-pritisnog ubrizgavanja sa natpunjenjem, dovode do viših opterećenja i povećanog habanja delova. Putem modifikovanja i prevlakom delova kontaktnih površina pogonskog sistema može da se smanji trenje i da se poveća otpor na habanje, čime se doprinosi smanjenju potrošnje goriva, a time se mogu zadovoljiti i propisi za emisiju CO₂.

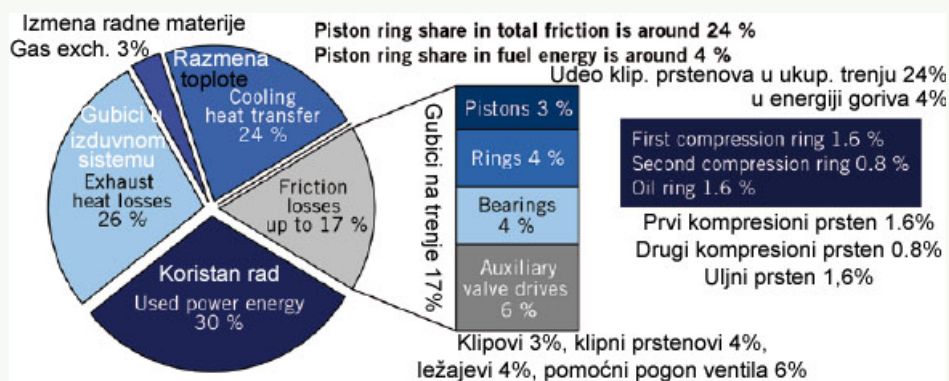
Tako na primer, na osnovu studije o "Ukupnoj potrošnji energije zbog trenja na putničkom vozilu, može se zaključiti da se adekvatnim eko-tribološkim merama na motoru SUS može uštedeti i do €576bn (US\$760bn) godišnje". Studija je iz 2012. god. i predstavlja zaključak katedre za tribologiju pri Daimler istraživačkom centru. Autori studije su predvideli godišnje smanjenje od 290 miliona tona CO₂, usled primene lakih konstrukcija i prevlaka koje doprinose smanjenju trenja u motoru SUS.

Zbog toga, proizvođači klipnih motora SUS i kompresora kontinualno rade na uvođenju mera za povećanje stepena iskorišćenja radnog procesa putem



Sl. 2 Uzroci neplaniranih otkaza klipnih kompresora
Fig. 2 Reasons for non-scheduled failures of the reciprocating compressors

smanjenja mehaničkih gubitaka koji nastaju usled dejstva sile trenja. Delovi klipne grupe, cilindar i kolenasto vratilo se nalaze u središtu svih istraživanja. Na primer, u okviru sklopa klipnih prstenova, ima dosta mogućnosti za smanjenje gubitaka na trenje zbog njegovog veoma visokog udela (24%) u ukupnim mehaničkim gubicima usled sile trenja. U vezi sa prethodnom činjenicom, treba podsetiti i na opširniju sliku koja se tiče gubitaka u motoru. Tako na primer, kod benzinskog motora SUS od ukupne energije koja se dobije sagorevanjem goriva, samo 30% se dobija na zamajcu, dok preostali deo odlazi na gubitke, slika 3. Od navedenih gubitaka, 3% odlazi na proces izmene radne materije, 17% na trenje, 24% se predaje rashladnom sistemu i 26% se gubi u toku procesa izduvavanja. Gubici na trenje se raspodeljuju sledećim procentima: klipovi 3%, klipni prstenovi 4%, ležajevi 4% i pomoćni pogon ventila 6% [3,7].



Sl. 3 Energetski dijagram benzinskog motora sa prikazanim udelom klipnih prstenova u ukupnim gubicima na trenje

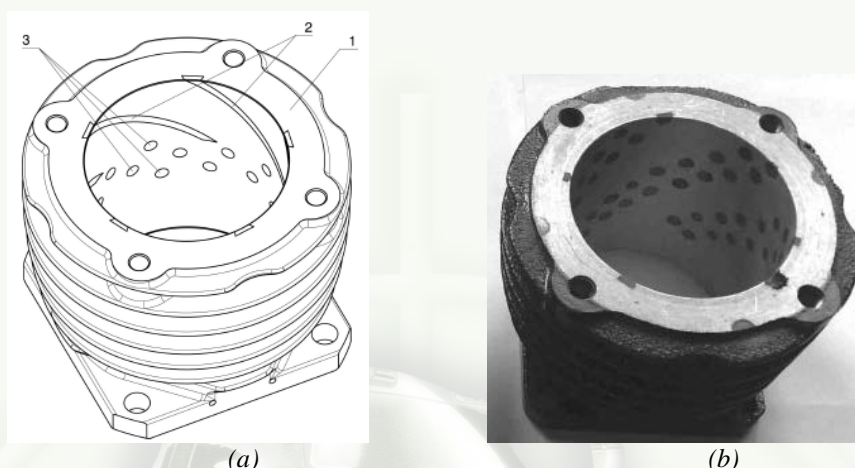
Fig. 3 Energy distribution diagram showing friction losses in gasoline engines with the proportionate share of the piston rings

Smanjenje trenja u klipnom motoru i kompresoru može da se ostvari primenom odgovarajućih materijala i optimizacijom konstrukcije klipa i klipne grupe. Prevlake su neophodne da bi se povećala čvrstoća posebno konstrukcija od aluminijumskih legura. Njihovom primenom se smanjuje trenje i habanje, koje može biti intenzivnije u uslovima visokih opterećenja i temperatura i pri upotrebi ulja za podmazivanje niže viskoznosti. Pravilan izbor specifikacije motornog ulja, ima veliki značaj i može da doprinese smanjenju trenja pogonskog sistema. Od ulja se očekuje da imaju nižu viskoznost, da obezbeđuju produžene intervale zamene, da su obogaćena aditivima kao što su modifikatori trenja i anti habajućim i anti oksidacionim agentima, i da su ekološki neutralna.

NOVA KONCEPCIJA TRIBOMEHANIČKOG SISTEMA KLIPA I CILINDRA

Prethodno navedene smernice i postavke su implementirane u okviru istraživanja i ispitivanja patentiranog malog eksperimentalnog aluminijumskog klipnog kompresora za vazduh, čiji je odnos prečnik/hod klipa ($74/35 \text{ mm}\cdot\text{mm}^{-1}$). Bazna konstrukcija kompresora je bila izrađena od livenog gvožđa. Ispitivanje performansi predmetnog kompresora se upravo realizuje u Laboratoriji za motore SUS Fakulteta inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu (FINKG) [4,6,7].

Sa ciljem da se postignu čvrstoća i tribološke karakteristike delova klipne mašine od aluminijuma, najmanje slično livenom gvožđu, kao doprinos, patentiran je aluminijumski cilindar klipnog kompresora za vazduh, slika 4. Na unutrašnju površinu cilindra, čija je osnova od ALSi legure (EN ALSi10Mg) su nanošene prevlake u vidu praha plazma sprej postupkom u atmosferskim uslovima. Materijal prevlaka (na bazi gvožđa) je otporan na habanje i ima dobre mehaničke i tribološke karakteristike. Na unutrašnju površinu cilindra (1), koja je u stalnom kontaktu sa delovima klipne grupe su umetnuti i tribološki uključci grafita i to, u obliku kontinualno raspoređenih lamela – pločica (2) i/ ili diskretnih triboloških čepova u obliku kuglica – nodula, sfernog oblika (3) [2,7].



Sl. 3 (a) Presek patentiranog aluminijumskog cilindra sa tribološkim uključcima (2-kontinualni i 3-u obliku kuglica)

(b) Fotografija aluminijumskog cilindra koji je korišćen za demonstraciju tehnologije na FINKG

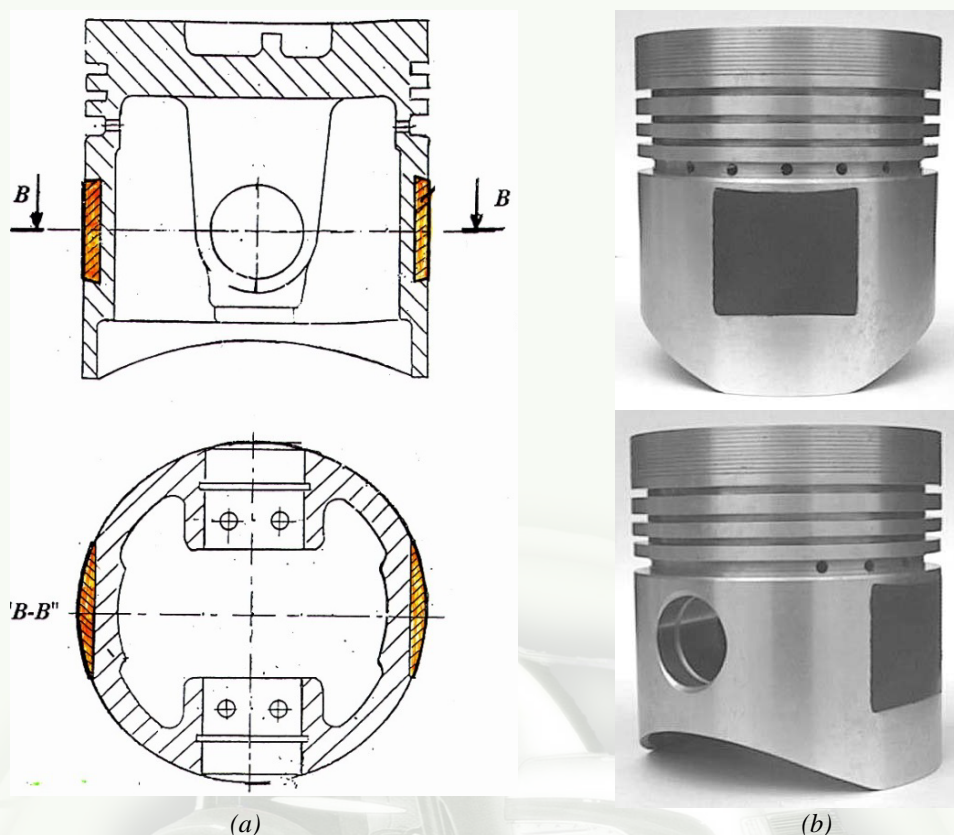
Fig. 4 (a) Cross section of patented aluminum cylinder with tribological pads (2-continual and 3-nodular discrete pads)

(b) Photography of aluminum cylinder that was used as a technology demonstrator at FINKG [2,7]

Cilj je bio da se površina cilindra dodatno mehanički ojača pomoću pravilno raspoređenih uključaka od grafita koji su udaljeni jedan od drugog, i koji su umetnuti u vidu pločica ili kao nodularni grafit. Poznato je da grafit kao čvrsto mazivo može da doprinese poboljšanju triboloških karakteristika sistema, kada se povećava i otpornost na habanje. Ovo je posebno važno prilikom optimizacije tribo-mehaničkih sistema kod kojih postoji problem sa podmazivanjem. U takve sisteme spada i ovde istraživani sklop klipne grupe koja je u stalnom kontaktu sa zidovima cilindra u dobro poznatim uslovima, bilo da se radi o motoru SUS ili klipnom kompresoru.

Osnova svih optimizacija sa aspekta tribologije ima teorijskih osnova i cilj da se sva granična podmazivanja prevedu u hidrodinamička. U skladu sa navedenim zahtevom, kao drugi primer primene eko-triboloških znanja i optimizacije tribomehaničkih sistema, istraživački tim u

okviru FINKG je konstruisao i patentirao klip sa tribološkim umetcima. Klip ima primenu u okviru klipnih mašina, kako motora SUS, slika 5, tako i klipnih kompresora [7].



Sl. 5 (a) Poprečni presek patentiranog aluminijumskog klipa sa tribološkim umetcima
(b) Fotografija nove konstrukcije klipa sa ugrađenim tribološkim umetcima [7]
Fig. 5 (a) Cross section of patented aluminum piston with tribological pads
(b) Image of new piston design with mounted tribological pads [7]

Zadatak triboloških umetaka koji su integrisani u okviru novog rešenja konstrukcije klipa, jeste da doprinesu smanjenju gubitaka na trenje u okviru tribomehaničkog sistema klipa i cilindra, i to posebno u uslovima prvog starta mašine.

Primenom pronalaska klipa sa tribološkim umetcima, problem habanja klipa se prevodi na izmenljive umetke. Posmatrano sa aspekta eksploatacije, održavanje sklopa klipne grupe se u budućnosti odnosi na zamenu lako izmenljivih klipnih prstenova i umetaka i to u određenim servisnim intervalima. U tim uslovima, klip se posmatra kao nosač lako izmenljivih delova.

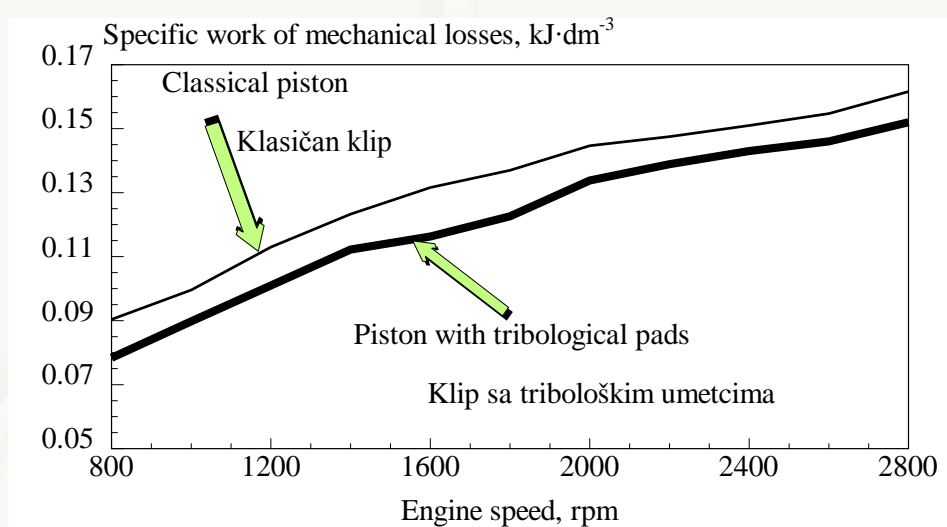
EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Prvi eksperimenti su obavljani od strane istraživača FINKG na eksperimentalnom jednocilindričnom četvorotaktnom motoru SUS koji se hladi vazduhom (tip: 3LD450,

proizvođač: DMB – Lombardini). Osnovne karakteristike eksperimentalnog motora i opreme su prikazani u okviru rada autora profesora R. Pešića i saradnika [7].

Na slici 6 je prikazano poređenje vrednosti specifičnog efektivnog rada mehaničkih gubitaka eksperimentalnog motora SUS pri radu sa klasičnim klipom koji se izrađuje od sivog livenog gvožđa, kao i sa aluminijumskim klipom sa tribološkim umetcima. Merenje je izvršeno u laboratorijskim uslovima, na motoru bez sagorevanja putem "motoriranja" metodom demontaže/ eliminacije delova. Prvo je demontirana glava cilindra da bi se odredila snaga otpora u cilindru, a zatim klipni prstenovi pojedinačno i na kraju klip i klipnjača. Svaki put je izvršeno ponovno merenje momenta, tako da razlika predstavlja udeo pojedinačne komponente u ukupnim gubicima.

Analizom rezultata može se zaključiti da je ostvaren cilj primene klipa sa tribološkim umetcima, na taj način što je potvrđeno smanjenje trenja u okviru tribomehantičkog sistema klipa i cilindra.



Sl. 6 Zavisnost specifičnog efektivnog rada mehaničkih gubitaka od broja obrtaja pri motoriranju

Fig. 6 Specific work of mechanical losses vs. engine motoring speed

Dalja istraživanja su usmerena na određivanje triboloških karakteristika novih konstrukcija klipa i cilindra klipnog kompresora za vazduh u uslovima klizanja (intenzitet habanja ...), kao i na ispitivanje i optimizaciju performansi eksperimentalnog klipnog kompresora.

ZAKLJUČCI

Od vozila se zahteva da zadovolje sve strožije propise za emisiju otrovnih i štetnih produkata sagorevanja. Tim putem, direktiva Evropske komisije 93/116/EC propisuje ukupnu emisiju CO_2 na prosečnih $130 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ za sva novo proizvedena putnička vozila počevši od 2015. godine i $95 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ od 2020. godine.

Putem modifikovanja i prevlakom delova kontaktnih površina pogonskog sistema može da se

manji trenje i da se poveća otpor na habanje, čime se doprinosi smanjenju potrošnje goriva, a time se mogu zadovoljiti i propisi za emisiju CO₂.

Sa ciljem da se postignu čvrstoća i tribološke karakteristike delova klipnih mašina od aluminijuma, najmanje slično livenom gvožđu, patentiran je aluminijumski cilindar klipnog kompresora za vazduh. Na unutrašnju površinu cilindra koja je u stalnom kontaktu sa delovima klipne grupe su umetnuti tribološki uključci grafita i to, u obliku kontinualno raspoređenih lamela – pločica i/ ili diskretnih triboloških čepova u obliku kuglica – nodula, sfernog oblika.

Kao drugi primer primene eko-triboloških znanja i optimizacije tribo mehaničkih sistema, patentiran je klip sa tribološkim umetcima. Klip ima primenu u okviru klipnih mašina.

Preliminarni rezultati ispitivanja su pokazali opravdanim cilj primene klipa sa tribološkim umetcima, tako što je potvrđeno smanjenje trenja u okviru tribo mehaničkog sistema klipa i cilindra.

ZAHVALNOST

Ovaj rad je rezultat istraživanja na projektu Tr 35041 koji je finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

LITERATURA

- [1.] Habing, R.A. (2006). Flow and Plate Motion in Compressor Valves. PhD Thesis, Univ. Twente.
- [2.] Journal: Intellectual Property Gazette. Pešić, R., Ješić, D. and Veinović, S. 2008. Piston compressors and IC engines cylinder with inserted tribological inserts. The Intellectual Property Office of the Republic of Serbia, Belgrade, 2008/3, pp.598-599.
- [3.] Kennedy, M., Hoppe, S. and Esser, J. Piston ring coating reduces gasoline engine friction. MTZ Motortechnische Zeitschrift 73 (2012), 5, 40-43.
- [4.] Milojević S., Pešić R., Taranović D. (2012). Izvođenje ventila klipnih kompresora i uslovi pri modeliranju, Journal Tractors and Power Machines, Novi Sad, ISSN 0354-9496(2012) 17: 2/3, p. 71-77, UDK 621.629.
- [5.] Mullner T. and Bielmeiler O. (2008). Heat Transfer in Small Piston Compressors. Purdue International Compressor Engineering Conference. Paper 1908.
- [6.] Ninković, D., Taranović, D., Milojević, S. and Pešić, R. (2012). Modelling valve dynamics and flow in reciprocating compressors – a survey. International Congress Motor Vehicles & Motors 2012, Kragujevac, October 3rd-5th, 2012, Proceedings (Pešić R., Lukić J.), MVM2012-022, pp. 113-125, ISBN 978-86-86663-91-7.
- [7.] Pešić, R. (2004). ASMATA – Automobile Steel Material Parts Substitution with Aluminum. Int. J. Vehicle Mech., Engines and Transportation Syst. Special Edition, 30, 1-168 (In Serbian and English).
- [8.] www.bendix.com, accessed on August 31th 2014.
- [9.] www.federalmogul.com, accessed on August 18th 2014.
- [10.] www.knorr-bremse.com, accessed on July 26th 2012.
- [11.] www.ricardo.com, accessed on August 18th 2014.

Rad primljen: 24.10.2014.

Rad prihvaćen: 29.10.2014.