

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

UVODNIK INTRODUCTION ПЕРЕДОВИЦА	B. IVKOVIĆ: TRIBO'85 - Međunarodna konferencija o trenju, habanju i podmazivanju -- TRIBO'85 - International scientific conference on friction, wear and lubricants - ТРИБО'85 - Международная конференция о трении, износе и смазке -- -	67
ISTRAŽIVANJA RESEARCH ИССЛЕДОВАНИЯ	R. M. MATVEJEVSKIJ, I.A. BUJANOVSKIJ, V.L. LAŠHI, G.I. ŠOR, A.B. VIPPER: Kinetika i termodinamika podmazujućeg dejstva - Kinetics and thermodynamics of the lubrication action - Кинетика и термодинамика смазочного действия - - - - -	69
	Č. KAJDAS: Mechanizam podmazivanja negativnih jona radikala iz komponenata mazivih ulja - Negativ-ion-radical lubrication mechanism of oil components - Механизм смазки отрицательных ионов радикала из компонентов смазочных масел - - - - -	74
	V. SAVIĆ: Sistemi za kontinuirano podmazivanje (I dio) - Systems for continuous lubrication - Системы для непрерывной смазки - - - - -	84
KNJIGE I ČASOPISI BOOKS AND JOURNALS КНИГИ И ЖУРНАЛЫ	- - - - -	96
NAUČNI SKUPOVI SCIENTIFIC MEETINGS НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ	- - - - -	98
PEZIMEA ABSTRACTS РЕЗЮМЕ	- - - - -	99

TRIBO '85.

Međunarodna konferencija o trenju, habanju i podmazivanju

Internationalna naučna konferencija o problemima trenja, habanja i podmazivanja održana je od 22.-26. maja 1985. godine u Taškentu, SSSR u organizaciji Akademije nauka SSSR-a, Ministarstva za visoko i više obrazovanje SSSR-a, Akademije nauka Uzbekistanske SSS i Ministarstva za visoko i više obrazovanje iz Uzbekistanske SSSR.

U organizacionom komitetu bio je zastupljen veći broj poznatih naučnih radnika iz SSSR-a i ostalih zemalja sveta uključujući i Jugoslaviju (D. Verčon). Konferencija je obuhvatila praktično sve oblasti tribologije a posebna pažnja bila je posvećena onim pravcima istraživanja u kojima je napredak poslednjih godina bio veoma brz i koji su se odnosili na razvoj kriterijuma i metoda proračuna u oblasti trenja i habanja, elastohidrodinamiku, fizičko-hemiske procese pri trenju, antifrikcione i frikcione materijale, postupke oplemenjivanja kontaktnih površina itd.

Na Konferenciji je saopšteno 16 referata na plenarnim sednicama, 270 radova na 9 sekcija a 214 saopštanjia je prikazano na posterima. Na Konferenciji su uzeli aktivnog učešća naučno istraživački radnici iz Austrije, Bugarske, Čehoslovačke, Finske, Francuske, Zapadne Nemačke, Istočne Nemačke, Engleske, Madjarske, Poljske, Pukunijske, Švajcarske, Švedske, SAD, SSSR-a, Zapadnog Berlina i Jugoslavije (B. Ivković).

Posle ceremonije otvaranja na prvoj plenarnoj sednici govorio je P. Jost (Engleska) o razvoju i organizaciji transfera tehnologije u oblasti tribologije na internacionalnom planu. Kao predsednik Evropskog društva za tribologiju P. Jost je izneo i vrlo interesantne podatke o savremenim istraživačkim projektima iz oblasti tribologije koji se realizuju u više zemalja Zapada i SAD. Zapaženi su bili projekti koji su se odnosili na kompjuterizaciju triboloških istraživanja i vezu između produktivnosti i tribologije.

Uvodni referat o problemima habanja tvrdih tela podneo je akademik A. Yu. Ishlinskii. Referat je napisan u saradnji sa I. V. Kragelskii koji nažalost nije prisustvovao Konferenciji zbog bolesti.

U nastavku plenarne sednice po podne podneto je još nekoliko referata među kojima je bio i vrlo interesantan rad grupe autora na čelu sa akademikom V. A. Balyi u kome se govorio o glavnim pravcima razvoja nauke o tribološkim materijalima.

Plenarne sednice odvijale su se nadalje svaki dan pre podne u trajanju od jednog časa i to zaključno sa nedeljom, 26. maja. Posle kratkog plenarnog zasedanja svaki dan je bio organizovan rad po sekcijama u posebnim salama. Nekoliko naslova saopštenja na plenarnim sednicama može da pruži izvesnu sliku o glavnim temama Konferencije. To su:

- Tribološki sistemi: dve površine i maziva,
- Teorija habanja i konstruisanja za lokalne elastične kontakte,
- Fizika i hemija klasičnog tečenja,
- Veza izmedju triboloških istraživanja i konstruisanja u praksi,
- Mehaničke karakteristike podmazujućeg sloja pri graničnom podmazivanju,
- Teorija trenja i simulacija habanja kao osnovi za ubrzana tribološka ispitivanja,
- Nivo energije u parovima trenja,
- Problemi trenja, habanja i podmazivanja u uslovima hladne klime,
- itd.

Podela referata po sekcijama takođe može da ukaže na svu širinu tribološke problematike u ovom trenutku.

Prva sekcija tretirala je probleme trenja tvrdih tela. U okviru ove sekcije razmatrani su radovi iz oblasti mehanike kontakta, suvog i graničnog trenja i gubit-

taka usled trenja u tribu mehaničkim sistemima.

U drugoj sekciji razmatrani su problemi elastohidrodinamike, hidrodinamike i gasnog podmazivanja. Prva grupa referata odnosila se na hidrodinamičko podmazivanje u mašinama. Druga grupa referata obuhvatila je oblast teorije elastohidrodinamičkog podmazivanja. Teorija i proračun gasno podmazivanih ležišta bili su predmet razmatranja u trećoj grupi referata. Četvrta grupa referata u okviru ove sekcije odnosila se na podmazivanje u tehničkim procesima.

U okviru treće sekcije razmatrani su problemi habanja svih vrsta. Prva grupa referata odnosila se na metode proračuna habanja. Druga grupa referata obuhvatila je opštu problematiku habanja sa gledišta vrste i mehanizma habanja kao i uticaja habanja na proces ostvarivanja kontakta. U ovom delu treće sekcije učešće su uzeli naučno istraživački radnici iz više zemalja uključujući i SAD i Francusku. Treća grupa referata odnosila se na ferografiju i dijagnostiku mašina.

Četvrta sekциja razmatrala je probleme vezane za efekte podmazivanja i maziva. U okviru ove sekcije referati su bili podeljeni u tri grupe. Prva grupa referata obuhvatala je problem mehanizma efekata podmazivanja, druga grupa razvoj i primenu maziva i njihovih aditiva a treća grupa se odnosila na analizu podmazujućih sredina.

Peta sekcijsa odnosila se na samoorganizuće procese u frikcionim kontaktima. Referati su bili podeljeni u ovoj sekciji u pet grupa od kojih se prva odnosila na selektivni transfer, druga na hidrogensko habanje, treća na tribomehaničke sisteme sa malim trenjem, četvrta na tzv. samoorganizuće probleme u frikcionim kontaktima a peta na probleme tribopolimerizacije.

Tribo-tehnički materijali bili su predmet razmatranja u šestoj sekciji u kojoj su referati bili podeljeni na četiri grupe. Prva grupa referata odnosila se na metale za frikcione jedinice. U drugoj grupi razmatrani su tribološki problemi primene tribo-tehničkih polimernih materijala. Treća grupa referata razmatrala je procese trenja i habanja u kontaktnim parovima koji su izradjeni od metalokeramike i tzv. grafitnih materijala. Poslednja grupa referata u ovoj sekciji odnosila se na antifrikcione (antihabajuće) prevlake.

U sedmoj sekciji prikazani su referati koji su se odnosili uglavnom na probleme razvoja ubrzanih metoda ispitivanja u oblasti tribologije bilo kroz simulaciju trenja i habanja ili na drugi način. Prva grupa referata razmatrala je mogućnost simulacije trenja i habanja i oni su imali sistemski karakter. Druga grupa referata obrazdjavala je opremu za tribološka ispitivanja dok se treća grupa referata odnosila na metode ispitivanja i to metode koje ne traže mnogo vremena za dobijanje odgovar-

ajućih rezultata.

Osma sekcijsa bavila se uglavnom mogućnostima za povećanje otpornosti na habanje elemenata tribomehaničkih sistema svih vrsta uključujući i tribomehaničke sisteme u kojima se razvija proces prerade materijala. Prva grupa referata odnosila se na mogućnost otvrdnjava površina pomoću lasera, plazma postupaka i implatacija različitih vrsta. Druga grupa referata razmatrala je, uglavnom, problematiku poboljšanja otpornosti na habanje reznih alata i mogućnost upravljanja procesom habanja kod tribomehaničkih sistema koji rade u otežanim uslovima. Poslednja grupa referata u ovoj sekciji sadržavala je informacije o novim kombinovanim metodama za obradu kontaktnih površina.

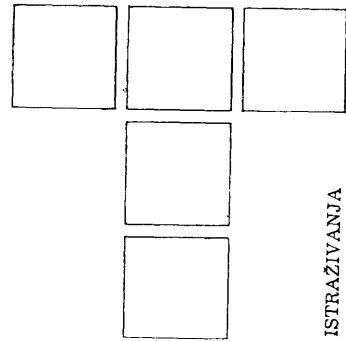
Poslednja sekcijsa na Konferenciji razmatrala je probleme trenja izmedju elemenata mašina i zemlje. U okviru ove sekcije razmatrani su tribološki procesi koji se javljaju pri klizanju po zemlji, leđu i snegu a nisu zaboravljeni ni problemi seizmičke prirode.

Poslednji dan Konferencije održano je nekoliko okruglih stolova sa većim brojem tema. O širini tribološke problematike koja je razmatrana na ovoj Konferenciji i na kojoj se istražuje danas u svetu može da ukažu i naslovi tema na okruglim stolovima. To su:

- Priroda spoljašnjeg trenja,
- Putevi razvoja u oblasti hidrodinamičke teorije podmazivanja,
- Proračun habanja elemenata tribomehaničkih sistema,
- Savremeni materijali za ležišta,
- Fizičko-hemijski i hemijski aspekti podmazivanja pri graničnom trenju,
- Tribo-tehničke karakteristike upravljanja,
- Ubrzane metode ispitivanja trenja i habanja,
- Efekti kvaliteta obrade kontaktnih površina na otpornost na habanje elemenata tribomehaničkih sistema.

Konferencija je završena izrazito interesantnim kulturnim programom koji je obuhvatio i posetu istorijskim gradovima Uzbegistana, Samarkandu i Buhare.

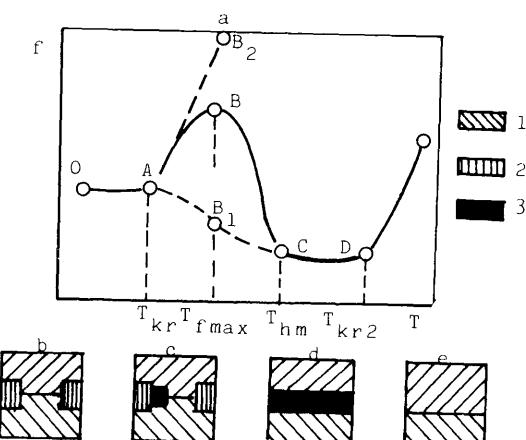
Skraćeni referati i apstrakti radova izloženi na Konferenciji štampani su u ukupno pet knjiga koje su podejmene učesnicima. Referati na plenarnim sednicama biće štampani u narednim brojevima časopisa "Trenje i iznos" i to na ruskom i engleskom jeziku. Dva referata sa plenarnih sedница prikazana su u ovom broju časopisa Tribologija u industriji sa namerom da se i domaćim čitaocima pokaze samo jedan delić problematike koja se na Konferenciji razmatrala.



Kinetika i termodinamika podmazujućeg dejstva

Savremenim uljima za podmazivanje u cilju poboljšanja podmazujućih svojstava dodaju se specijalni aditivi, koji po pravilu sadrže hemijski aktivne elemente - sumpor, hlor i fosfor ili njihove kombinacije, a takođe i neke druge elemente, na primer, cink, molibden, azot, bor i dr. Kao rezultat interakcije sa aktivnim komponentama, nastalom termičkim razlaganjem aditiva, na površinama trenja se formiraju modifikovani slojevi koji imaju smanjen otpor smicanju i obezbeđuju pozitivan efekat u procesu trenja (povećanje stvarne površine kontakta, smanjenje trenja, zamena intenzivnog adhezionog habanja umerenijim koroziono-mehaničkim). Obrazovanje, deformisanje i razaranje modifikovanih slojeva nastaje po pravilu na povišenim temperaturama koje se generišu u procesu trenja. Praktični i teorijski značaj poboljšanja podmazujuće sposobnosti ulja putem dodavanja aditiva, koji obezbeđuju formiranje slojeva različite prirode (adsorpcionih, hemijski modifikovanih) na površinama trenja, zahteva da se sa posebnom pažnjom pristupa razjašnjavanju mehanizma nastajanja tih slojeva i analitičkom opisivanju procesa sa ciljem da se omogući prognoziranje ponašanja aditiva u uslovima kontakta. U današnje vreme egzistiraju dva načina analitičkog opisivanja procesa nastajanja deformacija i razaranja podmazujućih slojeva: kinetički i termodinamički. Kinetički pristup je više rasprostranjen (pogledati na primer |1-3|), ali određivanje kinetičkih karakteristika procesa neposredno iz triboloških merenja odlikuje određena složenost, koja se može prevladati korišćenjem analitičkog modela zasnovanog na primeni temperaturske metode ocene podmazujućih svojstava ulja |4|. Pri tome se tribosistem posmatra kao sistem koji sadrži dva tela u kontaktu uronjena u podmazujuću sredinu sa aditivom (reagensom); pretpostavlja se da je sistem otvoren prema reagensu, tj. paralelno sa vezivanjem aditiva dovode se odgovarajuće nove količine. Proses se razmatra kao rezultat adsorpcije

molekula aditiva, njihovog razlaganja, reakcije aktivnih komponenata sa površinama trenja, deformacije i habanja produkata reakcije. Pri kontaktnim temperaturama manjim od T_{kr} (Slika 1) u uslovima graničnog podmazivanja nastaje umereno adheziono habanje i stabilan i dosta nizak koeficijent trenja (pogledati deo krive OA na sl. 1).



Sl. 1. - Zavisnost koeficijenta trenja f od temperaturi T pri graničnom podmazivanju (a) i pretpostavljeni modeli kontakta u karakterističnim tačkama (b-e): 1-metal površine trenja; 2-adsorbowani sloj; 3-hemijski modifikovani sloj

Granična temperatura T_{kr} do koje se realizuje usmereno adheziono habanje može se izraziti zavisnošću |5|:

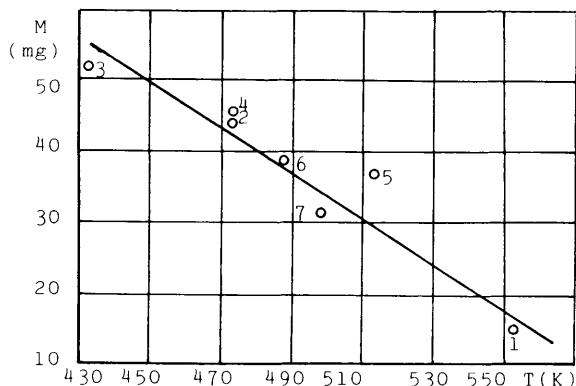
$$T_{kr} = \frac{E_c + \Delta\mu}{R[B + \ln(\frac{p}{c^n v^m})]}$$

tj., T_{kr} se određuje kinetičkim karakteristikama tribosprezanja ($E_c + \Delta\mu$, n), koncentracijom reagensa i režimom njegovog rada (p, v). Habanje pri temperaturama manjim

od T_{kr} opisuje se jednačinom:

$$I = k(1-T_{kr})(p-p_0) \quad (2)$$

Saglasno jednačini (2) uočava se recipročna linearna veza između kritičnih temperatura ulja za podmazivanje, određenih temperaturskom metodom u laboratorijskim uslovima, i habanja prvih klipnih prstenova osmo-cilindarskih motora ZIL-130, na kojima su ispitivane te podmazujuće sredine bez hemijski aktivnih aditiva protiv zadiranja površina [6]. Koeficijent korelacije iznosi 0,947 pri verovatnoći 0,95 (Slika 2).



Sl. 2. - Veza između gubitka mase prvog klipnog prstena ZIL-130 pri ispitivanju serije motornih ulja (M) i kritičnih temperatura tih ulja T_{kr} po podacima [6]

Pri temperaturama koje prevazilaze T_{hm} uočava se koroziono-mehaničko habanje, pod kojim se u ovom slučaju podrazumeva habanje modifikovanih slojeva nastalih u procesu trenja. Temperatura hemijske modifikacije T_{hm} u laboratorijskim uslovima određuje se temperaturskom metodom [4] i njen analitički opis ima oblik [7,8]:

$$T_{hm} = \frac{Ep - \Delta\mu}{R|B - \ln(c^n/v^m)|} \quad (3)$$

U prvom približenju proces koroziono-mehaničkog habanja opisuje se jednačinom predloženom u radu [9]:

$$I = \frac{c^n}{v^m} k \exp(-\frac{Ep - \Delta\mu}{RT})(p - p_0) \quad (4)$$

Određivanje kinetičkih karakteristika procesa $(Ep + \Delta\mu)$ i n u jednačini [4] obavlja se na osnovu temperaturskih zavisnosti koeficijenta trenja za dati reagens (aditiv) rastvoren u baznom ulju u različitim koncentracijama. Pri dopuštenom trib-hemijskom procesu prvog reda ($n=1$) vrednost $(Ep - \Delta\mu)$ jednaka je izvodu gasne kon-

tantne stepenovane u grom nagiba zavisnosti inverzne temperature hemijske modifikacije od logaritma koncentracije aditiva. Pri konstantnim uslovima ispitivanja $c = \text{const}$, $v = \text{const}$ formula (4) može biti napisana analogno obliku u radovima [10, 11] za proračun intenziteta habanja pri polutečnom mazivu:

$$I = k_h(p - p_0), \quad (5)$$

gde je saglasno formuli (4):

$$k_h = \frac{c^n}{v^m} k \exp(-\frac{Ep - \Delta\mu}{RT}) = k'' \exp(-\frac{Ep - \Delta\mu}{RT}) \quad (6)$$

Uporedjivanje formule (4) i (5) pokazuje da povećanje koeficijenta habanja k_h mora odgovarati smanjenje veličine $(Ep - \Delta\mu)/RT$. Potvrđićemo to za pet hemijski aktivnih sredina upoređujući rezultate ocene $(Ep - \Delta\mu)$ dobijenih u radu [7] temperaturskom metodom sa veličinama k_h za te sredine određenim na mašini sa četiri kuglice po metodi (12) u radu [9]. Kontaktne temperature T proračunavate su po metodi Bloka.

Rezultati uporedjivanja k_h i $(Ep - \Delta\mu)/RT$ za pet ispitivanih hemijski aktivnih sredina, dati u tabeli 1, potvrđuju ustanovljeno uvećanje koeficijenta habanja pri rastu $(Ep - \Delta\mu)/RT$, što sledi i iz uporedjivanja formule (4) i (5). Ovi rezultati omogućavaju da se donese ocena antihabajućih materijala sa tradicionalnim hemijski aktivnim aditivima na osnovu temperaturskih zavisnosti koeficijenta

TABELA 1. - Uporedjivanje podataka za veličinu $(Ep - \Delta\mu)$ i k_h za hemijski aktivne aditive rastvorene u vazelinskem ulju u koncentraciji 1%

Aditiv	$Ep - \Delta\mu$	$k_h \cdot 10^{-10}$ $(\text{MPa})^{-1}$
Bez aditiva	300	0,24
Difendisulfid	220	0,0228
Df-11	240	0,039
Dibenzidisulfid	77,6	0,184
Sulfol	95	0,070
LZ-23k	55,5	0,342

trenja. U današnje vreme raste primena aditiva novog tipa - antifrikcioni, tzv. "modifikatori trenja", čija je primena inicirana željom za smanjenjem disipacije energije [13]. Mehanizam dejstva tih aditiva zasnovan je na brzom uhodavanju kontaktnih površina, čime se obezbeđuje obrazovanje modifikovanih slojeva koji imaju značajnu sposobnost nošenja i koji se postepeno (mada veoma sporo) habaju u širokom dijapazonu opterećenja kontakta.

Prema tome, dovoljno niska granična vrednost energije aktivacije hemijski aktivne sredine obezbeđuje dobra antihabajuća svojstva. Posle uhodavanja, čiji se intenzitet karakteriše dovoljno niskom veličinom ($E_p - \Delta\mu$) uočava se veoma umereno habanje i antihabajuća svojstva tribosprezanja su velika. To dobro ilustruju rezultati ispitivanja serije amidotiofosfata u svojstvu antifrikcionalih aditiva bez soli u ulju M-11 za koje su određene kako vrednosti k_h , tako i ($E_p - \Delta\mu$), prikazane u tabeli 2, [14]. Nije teško uočiti da niske energije aktivacije ne izazivaju za aditive ovog tipa veliko habanje (tj. veliko k_h). Za ove aditive granična energija aktivacije ne karakteriše toliko otpornost na habanje, koliko antifrikcionalo dejstvo.

TABELA 2. - Uporedjenje graničnih energija aktivacije i koeficijenata habanja za 3% rastvore amidotiofosfata u ulju M-11 (na osnovu podataka [14])

Aditiv	$(E_p - \Delta\mu)$	$k_h \cdot 10^{-10}$
Bez aditiva	300	0,668
Didecildietilentriamintiofosfat	43,8	0,02
Di(oktilfenil)karbamidtiofosfat	232,5	0
Di(oktilfenil)tiokarbamidtiofosfat	64,3	0,113
Di(okstilfenil)dietilentriamintiofosfat	18,2	0,012

Uporedjivanje rezultata ispitivanja aditiva tri grupe (tradicionalnog ditiofosfata cinka - aditiv DF-11, aditiva protiv zadiranja tipa dibenzildisulfida ili sulfola i antifrikcionalih aditiva - amidotiofosfata) pokazuje znatne razlike u karakteru i mehanizmu njihovog podmazujućeg dejstva. Ditiofosfat cinka obezbeđuje dobra antihabajuća svojstva pri relativno malom antifrikcionom dejstvu zahvaljujući obrazovanju na površinama trenja izdržljivih prevlaka smanjene elastičnosti. Aditivi protiv zadiranja obezbeđuju zadovoljavajuća antifrikcionala svojstva pri visokim temperaturama, ali stimulišu intenzivno koroziono-mehaničko habanje usled stvaranja površinskih modifikovanih slojeva koji se lako habaju. Antifrikcionali aditivi, obezbeđujući brzo uhodavanje i povećanje stvarne površine kontakta na račun plastificiranja površina trenja, pospešuju obrazovanje polimolekularne prevlake i smanjenje udela metalnog kontakta. Temperatursko-kinetički metod omogućuje da se identifikuju ove vrste aditiva i ocenjuje efektivnost njihovog podmazujućeg dejstva.

Efektivnost podmazujućeg dejstva može se ocenjivati takodje, polazeći od osnovnih postavki kako ravnotežne, tako i neravnotežne hemijske termodinamike. Tako, npr.,

dokazano je da je veličina habanja proporcionalna promeni entropije sistema [17]. Pri tome habanje, kao slučajni proces, zavisiće od adsorpcione sposobnosti podmazujuće sredine na tarućim površinama i od intenzivnosti procesa hemijske modifikacije površina trenja. U izvesnoj meri celishodno je sveukupnost navedenih procesa ocenjivati metodama merenja energije izbijanja elektrona i odredjivanja površinskog rastvaranja [18]. Navedene metode omogućavaju ocenjivanje ponašanja graničnih podmazujućih slojeva u širokom dijapazonu temperatura. Rad izbijanja elektrona ocenjivan je putem odredjivanja elektrnomotorne sile (E) elektronske pare. Merna elektroda u posudi bila je izradjena od čelika ŠH-15, a elektroda za uporedjivanje od nerdjajućeg čelika. Merna elektroda prethodno se podvrgava obradi pri zadatoj temperaturi [19].

Karakteristike obrazovanih površinskih slojeva određuju se metodom površinskog rastvaranja, čime se određuje postojanost modifikovanih čeličnih površina prema dejstvu agresivnih sredina. U ispitivano ulje ubacivane su čelične kuglice i zadržavane 0,5 časova pri zadatoj temperaturi. Zatim su kuglice vajdene i posle 24 časa prenošene u 0,5% rastvor sone kiseline. Usled kontakta sa agresivnom sredinom dolazilo je do gubitka mase uzoraka koja je registrovana u toku eksperimenta (M) [18].

Nivo antihabajućih svojstava ulja (W) za par klipni prsten-zid cilindra može se prognozirati prema rezultatima laboratorijskih ispitivanja u saglasnosti sa formulom:

$$W \sim 1 + \log E | 1 + \log(1+4) |$$

Rezultati prognoze za ispitivana ulja M-11 sa sedam aditiva prikazani su u tabeli 3.

TABELA 3. - Antihabajuća svojstva ulja M-11 sa različitim aditivima (ispitivanje na jednocijlinskom uređaju)

Ulje i aditivi	Veličine habanja W	
	Proračunske (rel. jed.)	Eksperimentalne (rel. jed.)
M-11	1	1
M-11 + 1% aditiva A	0,82	0,81
M-11 + 2,65% aditiva B	1,2	1,58
M-11 + 1,7% aditiva C	0,7	0,52
M-11 + 1% aditiva D	1,05	1,36
M-11 + 2% aditiva E	0,7	0,63
M-11 + 1% aditiva FF	1,3	1,69
M-11 + 2,3% aditiva G	0,85	0,6

Na osnovu postavki hemijske termodinamike antifrikcionala svojstva sistema mogu se karakterisati ukupnom

energijom površine na granici faza (ΔH^{tp}), koja se očnjuje geometrijskom i hemijskom komponentom granice. Poslednje proizilazi iz osnovnih postavki termodinamike čvrstog stanja, koje karakterišu odgovarajuće entalpije ΔH_d i ΔH_s . Pri tome, ΔH_d je određeno strukturu dislokacija na granici deljenja, a ΔH_s postojanjem veza kroz granicu deljenja. Lako je pokazati da je sila trenja proporcionalna veličini ΔH^{tp} ili sumi $\Delta H_d + \Delta H_s$. Kombinovanje poslednjih veličina moguće je prognozirati dvema napred prikazanim laboratorijskim metodama.

Antifrikcionala svojstva ulja u širokom dijapazonu temperatura određivana su temperaturskom metodom na mašini KT-2 sa standardnim kuglicama od čelika ŠH-15.

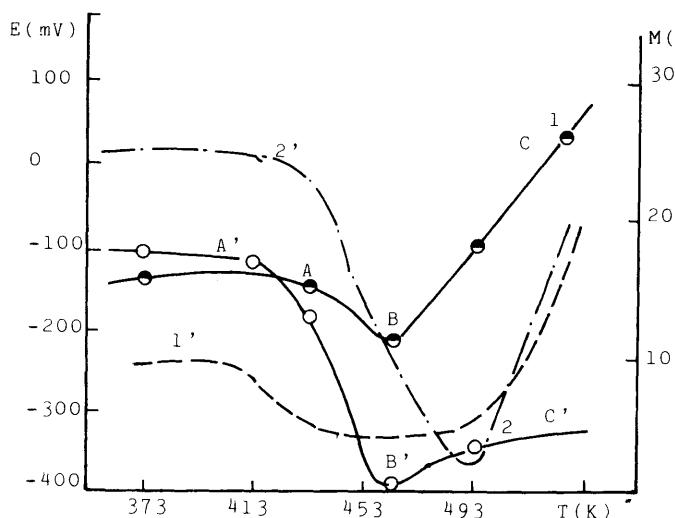
Ispitivanje je obuhvatalo izabrane aditive koji se razlikuju po efektivnosti antifrikcionog dejstva: ditiofosfat cinka i ditiofosfat molibdena. Ovi aditivi su dodavani ulju M-11 u koncentraciji 1%.

Kako je poznato, fizičko-hemijska priroda slojeva koje uzrokuju aditivi na površinama zavisi od temperature. Pri nižim temperaturama na metalnim površinama se formiraju prvenstveno adsorpcioni ili hemosorpcioni slojevi.

Povećanju temperature (iznad T_v) intenziviraju se površinske hemijske reakcije. Pri tome očigledno nastaju promene u strukturi hemijski modifikovanih površinskih slojeva. To potvrđuju rezultati dobijeni pri izučavanju međufaznih procesa metodom površinskog rastvaranja (sl. 3, krive 1 i 2).

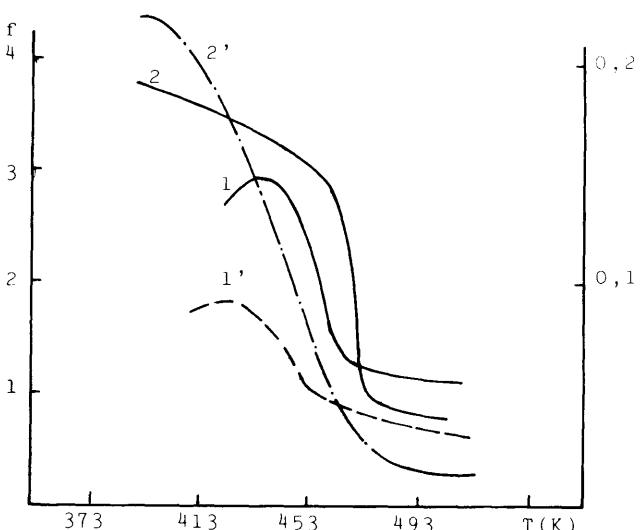
Do temperaturne T_v efektivnost antifrikcionog dejstva može se aproksimirati odnosom H/E , a pri temperaturi T_v delovi krivih BC i $B'C'$ na sl. 3. izrazom $H\Delta E$, gde su H -tvrdoča i ΔE -promena apsolutne vrednosti elektromotorne sile pri $T > T_v$ u poređenju sa veličinom elektromotorne sile pri $T = T_v$.

Proračunski i eksperimentalni rezultati prikazani su na sl. 4. Iz navedenih podataka sledi da proračunske krive dovoljno dobro opisuju karakteristike antifrikcionog dejstva aditiva u zavisnosti od temperature. Na taj način i kinetički i termodinamički prilaz mehanizmu podmazujućeg dejstva pokazuju da modifikovani slojevi, u zavisnosti od tipa aditiva, mogu imati različita fizičko-hemijska, a prema tome i mehanička svojstva koja mogu obezbediti antihibajuće dejstvo pri znatnom koroziono-mehaničkom habanju, izraženo antihibajuće dejstvo pri



Sl. 3. - Promena elektromotorne sile E i mase uzorka u rastvorima aditiva sa povećanjem temperature
1, 1'-ulje M-11 sa 1% ditiofosfata cinka;
2, 2'-ulje M-11 sa 1% ditiofosfata molibdena

Polazeći od postojećih eksperimentalnih podataka, a takođe imajući u vidu i rezultate koje su ranije dobili drugi autori moguće je pretpostaviti da u dijapazonu temperatura na delovima AB i $A'B'$ zavisnosti $E = f(T)$ na krivim 1 i 2 (sl. 3) nastaje hemijsko međudejstvo molekula aditiva i baznog ulja sa metalom. Pri daljem



Sl. 4. - Zavisnost eksperimentalnih i proračunskih vrednosti koeficijenta trenja od temperature (oznake su iste kao na sl. 3)

nepostojanju značajnijeg antifrikcionog efekta i visoki antifrikcionali efekat pri malom habanju. Koristeći te metode mogu se dovoljno zasnovano birati aditivi koji se dodaju uljima potrebnih frikcionih karakteristika.

OZNAKE

T - temperatura, T_{kr} - kritična temperatura, T_{th} - temperatura hemijske modifikacije, E_s - energija aktivacije procesa formiranja metalnih veza, $\Delta\mu$ - razlika hemijskih potencijala aktivnih molekula u adsorbovanom i rastvorenom obliku, C - koncentracija aditiva, v - brzina klizanja, p - kontaktni pritisak, n - eksponent, I - intenzitet habanja, R - univerzalna gasna konstanta, B_1, B_2 - konstante, k_h - koeficijent habanja, p_0 - pritisak pri kojem se prekida habanje, k, k' - koeficijenti, H_t - tvrađača pri datoj temperaturi išpitivanja, E_p - energija aktivacije obrazovanja modifikovanih slojeva, T_{kr_2} - druga kritična temperatura, E_n - energija aktivacije habanja modifikovanog sloja, E - elektromotorna sila čeličnog para elektroda, W - nivo antihabajućih svojstava ulja, ΔH_d , ΔH_s - geometrijska i hemijska komponenta entalpije, T_v - temperatura intenzivne hemijske modifikacije, ΔE - apsolutna promena elektromotorne sile pri $T > T_v$.

LITERATURA

- [1] BERŠADSKIJ L.I., BOGDANOVIC A.I.: O kinetičkoj teoriji mehano-hemičeskogo iznosa, Probljemi trenija i iznašivanja, vyp. 16, 1980, str. 30-37.
- [2] PODOLJSKIJ J.J., CURKAN I.G., KOREPOVA I.V., HEJLO I. V.: Protiviznosnoe dejstvije prisadok k smazočnym materialam s pozicij kinetiki tribohimičeskikh reakcij, v kn.: "Fiziko-hemičeskie osnovy smazočnogo dejstva", tezisy dokladov, 29-31 maja 1977. god. Kišinjev; Štiinca, 1979, str. 23-24.
- [3] KULAGIN V.V., LAŠHI V.L., VIPPER A.B. i dr., Uravnenije dlja opredelenija effektivnosti protivoiznosnava dejstvija prisadok k smazočnym maslам, Himija i tehnologija topliv i masel, 1976. No 7, str. 52-54.
- [4] MATVEJEVSKIJ R.M., BUJANOVSKIJ I.A., LAZOVSKAJA O.V.: Protivozadirmaja stojkost graničnyh smazočnyh sloev pri trenii v rešime graničnoj smazki, M., Nauka, 1978. 192 str.
- [5] VASILJJEV J. N., BUJANOVSKIJ I.A., MATVEJEVSKIJ R.M. i dr., Modelj zajedanija pri graničnoj smazke, v kn.: "Rasčjotno-eksperimentaljnyje metody ocenki trenija i iznosa", M. Nauka, 1980. str. 65-69.
- [6] ŽILKO V.N., BUJANOVSKIJ I.A., LISENKOJ J.G., O svazi među temperaturnoj stojkostju motornih modela i ih protiviznosnymi svojstvami, Trenije i iznos, 1983, Tom 4, No 4, str. 724-727.
- [7] BUJANOVSKIJ I.A., K ocenke nižnih temperaturnih predelov dejstvija himičeski aktivnyh prisadok,

Trenije i iznos, 1981, Tom 2, No 4, str.701-707.

- [8] BUJANOVSKIJ I.A., Ocenka verhneva temperaturnava predela effktivnava dejstvija himičeski aktivnyh prisadok pri graničnoj smazke, Trenije i iznos, 1982, Tom 3, No 4, str. 723-724.
- [9] BUJANOVSKIJ I.A., MATVEJFVSKIJ R.M., NATČUK A.I., Nekatorye aspekty ocenki korozionno-mehaničeskava iznosa pri treniji u uslovjih graničnoj smazki, Trenije i iznos, 1981, t.2, No 6, str. 978-986.
- [10] HRUŠČOV M.M., Isljedovanije prirabotki podšipnikovih splavov i capf., M.L., AN SSSR, 1948, 158 str.
- [11] PRUŽANSKIJ L.J., Issljedovanija metodov ispytanij na iznašivanje, M. Nauka, 1978, 112 str.
- [12] BUJANOVSKIJ I.A., MATVEJEVSKIJ R.M., NATČUK A.I., Vlijanije bazovyh masel na protivoiznosnye svojstva nekotoryh sovremenih prisadok, v. kn.: "Issledovanije smazočnyh materialov pri treniji", M. Nauka, 1981., str. 41-45.
- [13] LAŠHI V.L., VIPPER A. B., KULAGIN V.V., Vysokotemperaturnye antifrikcionniye prisadki k motornym maslam, Trenije i iznos, 1980, Tom 1, No 4, str. 749-753.
- [14] BLOHINA I.V., Sintez i issljedovanije prisadok k smazočnym maslam na osnove dialkil- i di(alkilaril) tiofosfornyh kislot i aminov, Avtoreferat diss. učenoj step. kand. tehn. nauk, M. MINH i GP, 1983., 23 s.
- [15] LAŠHI V.L., VIPPER A.B., ŠOR G.I., KUZNJECOV J.V., Rasčjot effektivnosti protivoiznosnava dejstvija prisadok k smazočnim maslам, v kn.: "Fiziko-hemičeskie osnovy smazočnava dejstvija", tezisy dokladov, Kišinev, Štiinca, 1979, str.25-26.
- [16] LAŠHI V.L., VIPPER A.B., Termodinamičeskij podhod k ocenke effektivnosti i protivoiznosnava dejstvija prisadok k smazočnym maslam, Dvigatelestr, 1981, No 5, str. 23-25.
- [17] KLAMESKY B.E., Wear-an entropy production model, Wear, 1980, v. 58, p. 325-330.
- [18] ŠOR G.I., KUZNJECOV J.V., TROFIMOVA G.L. Issljedovanije mehanizma obrazovanija graničnyh plenok na poverhnostjah trenija pod dejstvijem mesel s prisadkami, v. kn.: "Fiziko-hemičeskie osnovy smazočnava dejstvija", Kišinev, Štiinca, 1979, str. 30-31.

Mehanizam podmazivanja negativnih jona radikala iz komponenata mazivih ulja

UVOD

Poznato je da mehanizam dejstva glavnih komponenata mazivih ulja, a naročito anti-habajućih i anti-zarubavajućih aditiva, kompleksan, i da do sada nije potpuno objašnjen sa stanovišta hemijskih transformacija. Nema sumnje da tokom trenja, pod dejstvom povišene temperature i oksidacije, mehanizam izvesnog broja transformacija komponenata mazivih ulja uključuje i slobodne radikale. Međutim, izgleda da je interakcija organskih molekula, naročito heteroorganskih, po karakteru jonska, i to uglavnom anjonska [1-7]. Jedan od najsvršenijih hemijskih modela čiji je cilj objašnjavanje nekih interakcija između komponenata mazivih ulja i tarućih površina bazira se na procesu razmene elektrona [7]. Pretpostavlja se da je jedan od prvih procesa koji se dešavaju u uslovima graničnog podmazivanja upravo procesa razmene elektrona. Ovaj model objašnjava, na primer, ponašanje teških aromata u friкционim parovima, ali ne objašnjava dejstvo drugih ugljovodonika, kao što su naftheni i parafini. Model ne objašnjava na zadovoljavajući način formiranje radikalnih anjona, a ne uzima u obzir ni ponašanje zasićenih ugljovodonika u različitim atmosferama. Nema ni sugestija o daljim hemijskim transformacijama radikalnih anjona. Ovaj model je primenjen samo na ugljovodonike [1,7] i masne kiseline [4, 7]. Zbog toga se u ovom radu opisuje opšti anjonsko-radikalni model podmazivanja, baziran na mehanizmima jonizacije i fragmentacije komponenata mazivih ulja prouzrokovanih dejstvom egzoelektrona emitovanih iz tarućih površina.

EMISIJA EGZOELEKTRONA

Dobro je poznato da neki metali postaju elektronski emiteri posle mehaničkog, termičkog ili hemijskog tretmana. U literaturi [8-14] je opisano da do emisije egzoelektrona dolazi kada je površina materijala uznenjena plastičnom deformacijom, promenom faze, aorazijom

ili zamornim prskanjem. Emisija egzoelektrona je uočena i kod metala i kod nemetala, a postoje i jaki dokazi da je za emisiju elektrona neophodan oksidni ili drugi nemetalni površinski sloj. Do emisije egzoelektrona iz čiste, neopterećene, površine dolazi jednostavno posle adsorpcije kiseonika [15]. Na izolirajućim čvrstim površinama dolazi posle spoljašnje obrade prevashodno do nestacionarnih efekata [16]. Emisija elektrona i novoobradjenih površina dostiže maksimum neposredno po obradi, a potom opada sa vremenom [10, 11]. Egz'emisija se aktivira adsorpcijom i temperaturom. Njom delimično upravlja adsorpcija prisutnih gasova, kao što su azot, kiseonik, ili vodena para [17]. Smatra se da je energija egzoelektrona veoma niska, reda veličine 2 do 3 eV [18].

FORMIRANJE NEGATIVNIH JONA U KOMPONENTAMA MAZIVIH ULJA

Po mišljenju autora, ova, niska, energija egzoelektrona je dovoljna za formiranje negativnih jona jedinjenja koja služe kao komponente baznog ulja i anti-fripcionih aditiva, kao i aditiva za ekstremne pritiske, koji kao međuprodukti reakcije treba lako da reaguju sa pozitivno nanelektrisanom metalnom površinom, proizvodeći dano hemijsko jedinjenje. Elektronski afinitet izvesnih atoma, tj. energija u eV, oslobodjena u procesu



TABELA 1. Elektronski afinitet nekih atoma

Atom		Elektronski afinitet, eV
Vodonik	H	0.747
Ugljenik	C	1.25
Kiseonik	O	1.47
Sumpor	S	2.07
Jod	I	3.06
Brom	Br	3.36
Fluor	F	3.45
Hlor	Cl	3.61

data je u Tabeli 1 [19]. Na slici 1, koja pokazuje elektronegativnost [20] nekih elemenata, prikazani su oni elementi koji se normalno nalaze u aditivima protiv habanja i za ekstremne pritiske. Broj formiranih jona i

nih spektrografa sa reakcijama koje se dešavaju u zoni trenja.

OPŠTI MODEL MEHANIZMA DEJSTVA NEGATIVNIH JONA U KOMPONENTAMA MAZIVIH ULJA

Osnovna teza modela je da komponente maziva formiraju negativne jone, koji se potom hemisorbuju na pozitivno nanelektrisanim delovima tarućih metalnih površina. Rastavljaju se sledeće faze:

Polu-metali		Nemetali		
B	C	N	O	F
2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Al	Si	P	S	Cl
1.5	1.3	2.1	2.5	3.0
Ga	Ge	As	Se	Br
1.6	1.8	2.0	2.4	2.8
In	Sn	Sb	Te	I
1.7	1.8	1.9	2.1	2.5

Sl. 1. - Elektronegativnost nekih elemenata (i sprekidajući limija odvaja elemente koji se normalno nalaze u aditivima protiv habanja i aditivima za visoke pritiske)

njihova vrsta zavisiće od hemijskog karaktera jedinjenja (vrsta heteroatomske veze, vrsta supstituenata, itd.) i uslova trenja (materijal, opterećenje, sastav maziva, atmosfera, itd.). Negativni jon formiran prihvatom elektrona može dalje da disocira, proizvodeći niz negativno nanelektrisanih fragmenata, kao i neutralne fragmente. Do ekstenzivne fragmentacije obično ne dolazi.

Rezonantni zahvat $AB + e \rightarrow AB^-$ predstavlja preduслов za formiranje molekularnih anjona. Rezonantni zahvat se primećuje pri energijama elektrona od 0 do max. 2 eV. Disocijativni rezonantni zahvat $AB + e \rightarrow A^- + B$ primećuje se na energijama od 2-15 eV.

Takođe je poznato [21] da se u uslovima masene spektrografije pridruživanjem elektrona mogu dobiti spekttri negativnih jona. Elektroni niskih energija (2-e eV) pridružuju se molekulima, pri čemu se formiraju negativni joni. Pretpostavljajući da je energija egzoelektrona dovoljna da prouzrokuje ionizaciju tipičnih aditiva protiv trenja i zaribavanja, i prihvatajući tezu da su uslovi u mikro-površinama trenja slični onima koji vladaju u plazmičnim elektronskim izvorima masenih spektrografova EA tipa, što je vrlo moguće zbog niskih energija elektrona (reda 2 do 4 eV), moguće je grubo uporediti reakcije ovih aditiva do kojih dolazi u jonskim izvorima EA mase-

nih površina u različitim atmosferama, može se tvrditi sledeće:

1. Proces emisije nisko-energetskih elektrona (2-3 eV) i stvaranje pozitivno nanelektrisanih reda, obično na vrhovima neravnina. Proses emisije egzoelektrona zavisi od uslova trenja, tj. vrste materijala, opterećenja i atmosfere.

2. Interakcija mitovanih elektrona sa komponentama maziva blizu površine trenja, što dovodi do stvaranja negativnih jona i radikala. Broj stvorenih jona i njihova vrsta zavise od hemijskog karaktera jedinjenja. Razlike u stvaranju negativnih jona u različitim jedinjenjima mogu se objasniti razlikama u njihovim elektronskim afinitetima. Nisko-energetski elektroni (2-4 eV) mogu da formiraju negativne jone sa molekulima komponenata maziva sledećim mehanizmom: rezonantni zahvat, disocijativni rezonantni zahvat i pridruživanje jona ($AB + C^- \rightarrow AB^+ C^-$).

3. Reakcija negativnih jona sa metalnom površinom i druge reakcije (na primer, radikalne reakcije), pri čemu se formira organo-metalni (ili nemetalni) sloj, koji štiti frikcione površine od habanja. Kinetika ovih reakcija zavisi od sklonosti molekula maziva ka formiranju negativnih jona.

4. Ako je smicajno naprezanje veliko (ekstremni pritisici), ono može da dovede do kidanja hemijskih veza, pri čemu se formiraju dalji radikali. Radikali se mogu formirati od frikcionih polimera, i u prisustvu kiseonika podležu oksidaciji.

5. Formiranje neorganskog sloja koji kao meka prevlaka štiti taruće površine od zaribavanja.

DISKUSIJA

Ugovarajući

Na osnovu rezultata ispitivanja [1,22-25] uticaja zasićenih i aromatičnih ugljovodonika na habanje kontaktnih površina u različitim atmosferama, može se tvrditi sledeće:

- Primena aromatičnih ugljovodonika, a naročito po-

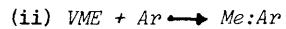
- linuklearnih jedinjenja kao maziva u inertnim i suvim atmosferama dovodi do brzog zaribavanja elemenata u kontaktu zbog veoma malog opterećenja.
- Kada se u frikcionim par uvedu voda ili kiseonik, dolazi do izraženog povećanja otpora na zaribavanje čeličnih elemenata u kontaktu sa aromatičnim ugljovodonikima.
- Zasićeni ugljovodonici sasvim jasno sprečavaju zaribavanje u inertnim atmosferama, dok u prisustvu vodenih pare i/ili kiseonika postaju slabo mazivo koje dovodi do zaribavanja.

Pokušaji da se interpretira ovakvo ponašanje ugljovodonika u različitim atmosferama izneti su u referenciama [1,7,23]. Objasnjenje netipičnog ponašanja aromatičnih ugljovodonika pod različitim uslovima, sa aspekta anti-habajućih osobina publikovano u [23] zasniva se na formiranju frikcionih polimera. Međutim, ono nije dovo-

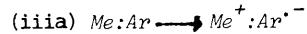
su u [1,7]. Model mehanizma dejstva aromatičnih ugljovodonika u različitim atmosferama i u prisustvu parafinskih ugljovodonika (sinergizam aromata i parafinskih ugljovodonika - Sl. 2), zasnovan je na formiranju stabilnih radikalnih anjona polinuklearnih aromatičnih ugljovodonika. Pojedine faze tog modela [1] su:



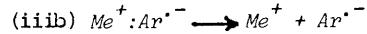
gde VMe označava nedirnutu metalnu površinu.



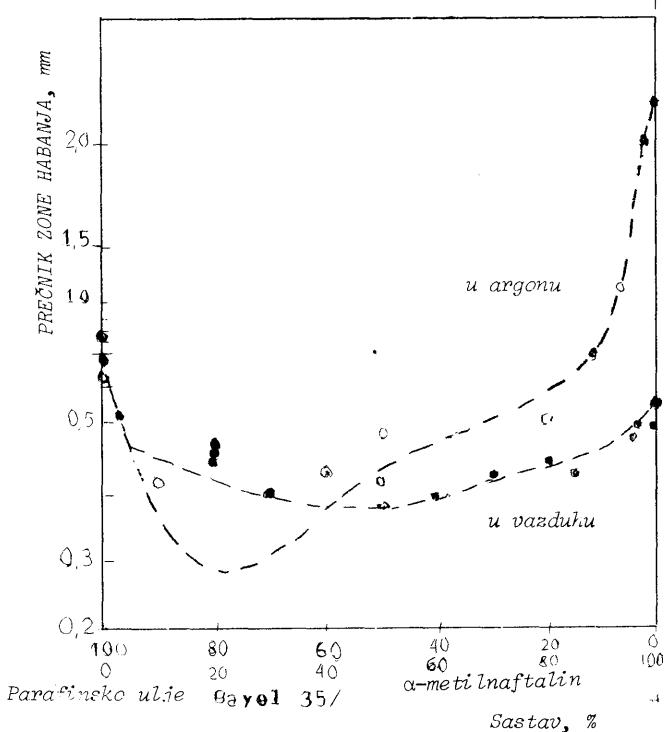
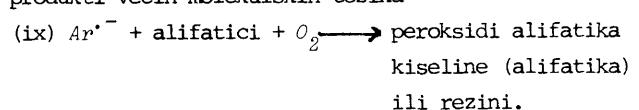
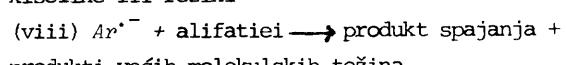
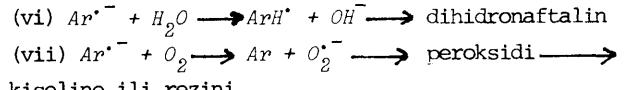
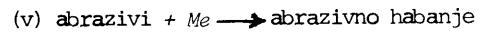
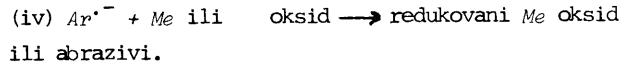
gde je Ar polinuklearni aromat, a $Me:Ar$ označava polinuklearni aromat adsorbovan u metalu.



(adsorbovani radikalni anjon).



(desorbovan radikalni anjon).



Sl. 2. - Sinergizam između parafinskog ulja (Bayol 35) i alfa-metilenafthalina, mašina sa 4 kugle, 1200 min^{-1} , temp. 20°C , radni period 15 min. [22]

ljno koherentno da bi obuhvatilo sve atipičnosti, uglavnom one koje se tiču zaribavanja. Dalji pokušaji da se objasni ponašanje aromatičnih ugljovodonika u friкционim parovima pod različitim ambijentnim uslovima predloženi

Prva faza (i) predstavljena u modelu [1] povezana je sa stvaranjem čiste (nedirnute) metalne površine. Nekontaminirana metalna površina adsorbuje polinuklearni aromati (faza (ii)) i putem prenosa elektrona iz metalne površine u aromati formira kompleks ugljovodonični radikalni anjon - metalni katjon (faza (iii)). Faza (iiib) predstavlja desorpciju aromatičnog molekula uključivanjem radikalnog anjona koji je medjuproizvod reakcije. Ovaj radikalni anjon može da učestvuje u bilo kojoj od mogućih reakcija predstavljenih fazama (iv-ix). Brže habanje (ili korozivno habanje) rezultat je dejstva radikalnih anjona na metalnu površinu (faza (iv)). Pod uslovima trenja to može da dovede do formiranja kristalnih FeC čestica i organometalnih ili čestica gvožđa (faza (v)). Voda (faza (vi)) i kiseonik (faza (vii)) lako reaguju sa radikalnim anjonom, prouzrokujući njihovo nestajanje, što dovodi do smanjenja habanja.

Prema ovom modelu, sinergističko anti-habajuće delovanje mešavine zasićenih i aromatičnih ugljovodonika (Sl. 2), rezultat je reaktivnosti aromatičnog radikalnog anjona koji, reagujući sa alifatičnim ugljovodonikom (faze (viii) i (ix)), formira jedinjenja tipa rezina na površinama kontaktног para, čime se inhibira habanje, jer je sprečen kontakt metala.

Mehanizam delovanja ugljovodonika iz prethodnih pasa generalno objašnjava ponašanje teških aromata u fricionim parovima. Međutim, on ne objašnjava kako deluju ostali ugljovodonici, kao napr. monoaromati, nafteni i parafini. Poznato je (Tabela 2) da ne-aromati, kao što

TABELA 2. - Efekat ugljovodonika sa dva prstena [22] *)

Ugljovodonik	Prečnik zone habanja (mm) za sledeće atmosfere		
	Suv argon	Suv vazduh	Vlažan vazduh
Dekalin	0.26	0.35	0.42
Fenilcikloheksan	0.31	0.33	0.50
Tetralin	0.25	0.42	0.68
Indan	0.30	0.31	0.42
Difenilmelan	0.29	0.43	0.62
Alfa-metilnaftalin	0.82	0.33	0.36
Inden	0.93	0.72	0.33

je dekalin, imaju ponašanje slično parafinima, sa slabim habanjem u argonu i jačim habanjem u suvom ili vlažnom vazduhu. Jednjenja sa jednim aromatičnim i jednim naftenskim prstenom, kao što je tetralin, imaju slično ponašanje. Jedino alfa-metilnaftalin i inden daju jako habanje u argonu, a interesantno je da oba daju najmanje habanje u vlažnom vazduhu. Aromati sa kondenzovanim prstenovima više su naklonjeni ljuštenju u suvom argonu nego ne-kondenzovani aromati [22].

Model [1] ne objašnjava dovoljno kako se formiraju radikalni anjoni. Takođe, nije dovoljno jasno šta se misli pod terminom "kompleks ugljovodonični radikalni anjon - metalni katjon $Me^+ : Ar^{*-}$ ", koji bi trebalo da se formira prenosom elektrona iz metalne površine u aromat, a posebno, kako se aromatični molekul može desorbovati kao radikalni anjon. Ovi detalji su kontraverzni i mogu se osporiti. Oni bi morali biti dalje razradjeni i bolje objašnjeni. Međutim, postojanje radikalnih anjona je nesporno. Napred diskutovani model ne uzima u obzir ponašanje zasićenih ugljovodonika u različitim atmosferama.

Ovo atipično ponašanje aromata i zasićenih ugljovodonika u različitim atmosferama u procesu trenja može se objasniti predloženim modelom negativnih jona radikala, na osnovu mehanizma jonizacije jednjenja.

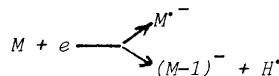
Iz podataka predstavljenih u Tabelama 2 i 3 može se zaključiti da prisustvo suvog argona proizvodi najveće habanje u slučaju alfa- i beta-metilnaftalina i indena. Kada se upotrebe kao maziva u vazduhu, ovi ugljovodonici se jasno odupiru habanju. Zasićeni ugljovodonici,

aromatični nafteni i difenil metan ponašaju se na potpuno različit način. Razlike u habanju (test "kuglica na cilindru") alfa-metilnaftalina (0,82 mm u argonu, 0,33 mm u vazduhu) i difenilmelana (0,29 mm u argonu, 0,43 mm u vazduhu) su posebno značajne.

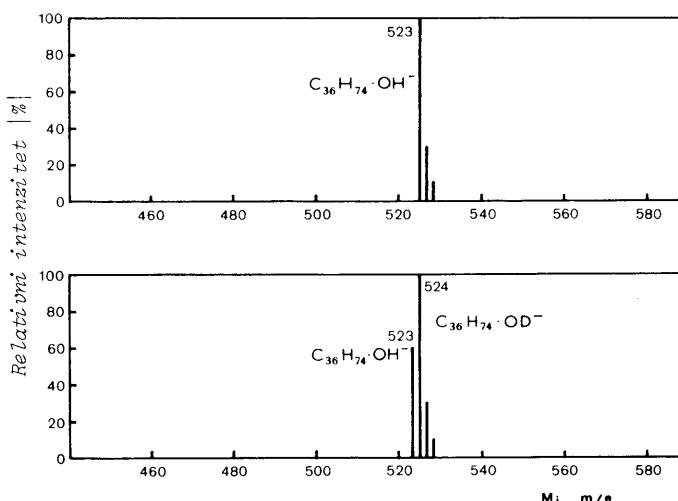
TABELA 3. - Efekat atmosfera [22] **)

	Prečnik zone habanja (mm) za sledeće ugljovodonike				
	Alfa-metilnaftalin	Beta-metilnaftalin	Naftalin	Fenantren	Bayol 35
Suv argon	1.83	1.43	1.45	2.70	0.35
Vlažan argon	0.61	0.93			
Suv vazduh				1.65	0.66
Vlažan vazduh	0.40	0.45	0.69		0.91

Negativni joni se najčešće proizvode u skladu sa mehanizmom:



gde je M organski molekul.



Sl. 3. - Pridruživanje OH^- ili OD^- n-heksatriakovatu u prisustvu para H_2O i D_2O u ionskom izvoru [21]

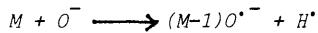
*) Test "kugla na cilindru": opterećenje 9,81 N, temper. $250^\circ C$, 240 min^{-1} , radni period 32 min.

**) Test "kugla na cilindru"; opterećenje 9,81 N, temp. $150^\circ C$, 240 min^{-1} , radni period 32 min.

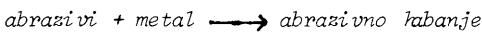
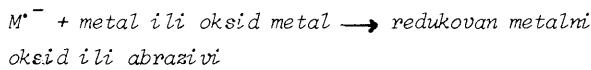
Zasićeni ugljovodonici bilo koje strukture predstavljaju izuzetak od gornjeg mehanizma. Da bi se dobili negativni joni od ovih vrsta molekula, treba im pridružiti jone OH^- [21]:



Ovaj mehanizam jonizacije može se ispitati malom količinom pare teške vode u jonskom izvoru. Zbog pridruživanja OD^- jona, pikovani se pomeraju prema sledećem višem masenom broju, kao što je pokazano za n -heksatriakontan na Sl. 3. Aromatični ugljovodonici mogu da daju dva tipa negativnih jona, i to tipično elektronsko pridruživanje: $M + e \longrightarrow M^-$, što je karakteristično za kondenzovane policiklične aromate, i pridruživanje O^- :



Bolje ponašanje kondenzovanih aromata u vazduhu nego u argonu može se objasniti na sledeći način: kondenzovani aromati jonizuju se u argonu mehanizmom zahvata elektrona: $M + e \longrightarrow M^-$. Radikalni joni reaguju sa pozitivno nanelektrisanim tačkama na friкционim površinama i dovode do ubrzanog habanja, sličnog onome prikazanom u 5 i opisanom reakcijama:



U prisustvu vode ili kiseonika, dolazi do drugog formiranja jona, tj. $(M-1)O^-$. Ovi radikalni joni, reagujući sa pozitivno nanelektrisanim pegama, suprotstavljaju se habanju formiranjem zaštitnog oksidnog sloja.

Bolje ponašanje zasićenih ugljovodonika u suvom argonu rezultat je činjenice da pod takvim uslovima ne može doći do formiranja anjona. Prema tome, ugljovodonici mogu ispravno da vrše svoju funkciju podmazivanja, ako radni uslovi nisu teški. Ako su prisutni voda ili kiseonik, dolazi do proizvodnje OH^- jona, koji reagujući sa molekulima zasićenih ugljovodonika grade $M OH^-$ jone. Ovi joni ponašaju se slično aromatičnim $(M-1)O^-$ jonom. Ova pretpostavka može se dokazati opštom sličnošću vrednosti prečnika zona habanja policikličnih aromata i zasićenih jedinjenja testiranih u prisustvu vode ili kiseonika (Tabela 2). Joni $(M-1)O^-$ i $M OH^-$ svih ovih jedinjenja sadrže kiseonik, koji prouzrokuje slične interakcije negativnih jona sa pozitivno nanelektrisanim tačkama na tamnim površinama.

Predloženi model negativnih jona radikala dobro objašnjava atipično ponašanje aromata i zasićenih ugljovodonika u različitim atmosferama u procesu trenja. On ko-

implementira model podmazivanja polinuklearnim aromatima izložen u [22]. Ostali detalji koncepta dejstva negativnih jona radikala ugljovodonika u smislu sprečavanja habanja i zaribavanja tokom trenja dati su u [5].

Organosumporni aditivi

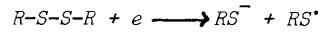
Antihabajuće osobine i osobine na ekstremnim pritiscima organosumpornih aditiva povezane su sa njihovom reaktivnošću prema metalima. Studije uticaja hemijske strukture na anti-habajuće i anti-zaribavajuće osobine niza sulfida [26-29] delimično su objasnile ponašanje sumpornih aditiva. Ima i drugih istraživanja [2,30-33], koja su se bavila mehanizmom dejstva sumpornih jedinjenja, naročito disulfida. Mehanizam formiranja sulfida podrazumeva formiranje slobodnih radikala [26,30]. U jednom radu rasmatra se mehanizam formiranja sulfida u graničnom podmazivanju na bazi karbanjona [2]. On se zasniva na prethodno predloženom mehanizmu anjonskog dejstva aromatičnih ugljovodonika [1]. Taj mehanizam se može ilustrovati na način predstavljen na Sl. 4. Slično mehanizmu dejstva polinuklearnih aromatičnih jedinjenja datom u [1], sa Sl. 4 nije jasno šta se misli pod desorbovanim kompleksom jedinjenja $[Fe_{xn}OSC]$, kao i kako se može molekul organosumpornog jedinjenja desorbovati kao OSC^- . Ovi detalji, kao i zadnje reakcije prikazane na Sl. 4, su kontroverzni i mogu se osporiti.

Iako su studije mehanizma delovanja aditiva sa sumporom, a naročito onih koji sadrže sulfide i disulfide [2,26-32] na relativno visokom nivou, još uvek ne postoji dovoljno detaljno razumevanje hemijskih reakcija kojima sumpor smanjuje trenje i habanje. Primena predloženog mehanizma podmazivanja negativnih jona radikala izgleda da popunjava neke od pukotina.

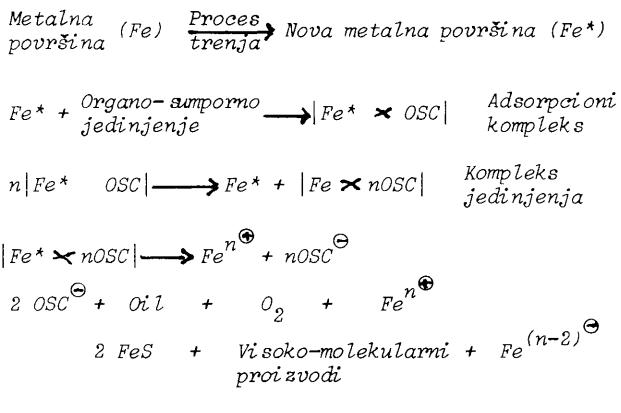
Opšte je prihvaćeno da disulfidi imaju bolje osobine na visokim pritiscima nego monosulfidi. Razlike se mogu jednostavno objasniti pomoću predloženog modela podmazivanja negativnih jona radikala. Monosulfidi i disulfidi se jonizuju u skladu sa mehanizmom disocijativnog zahvata. Osnovni proces razlaganja sulfida ide putem razbijanja veze C-S [21]:



dok se u slučaju disulfida radi o razbijanju veze $-S-S-$:



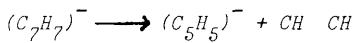
gde $RS^* + e' \longrightarrow RS^-$, a e' predstavlja elektron manje energije. Disulfidi daju takođe i jone RSS^- , koji mogu da proizvedu dalje RS^* radikale. Prema tome, zaključujemo da će disulfidi imati bolje osobine kada je upitanju



Sl. 4. - Šema mehanizma dejstva karbanjona organo-sumpornih jedinjenja [2]

nošenje opterećenja, zbog činjenice da je za formiranje istog broja RS^- jona potrebna niža energija [6].

Hemijnska struktura sulfida i disulfida ima značaj- an uticaj na njihove osobine. Na primer, dibenzil sulfid ima znatno bolje osobine pri visokim pritiscima nego di-fenil sulfid [27, 29]. Ta razlika se može objasniti na sledeći način: karakteristična osoba razlaganja sulfida koji sadrže benzilne grupe je formiranje ne samo RS^- jona, već takođe i $(C_7H_7)^-$ jona. Na primer, benzil fenil sulfid daje RS^- i $(C_7H_7)^-$ jone [21]. Sa druge strane, $(C_7H_7)^-$ joni se razlažu u acetilen i jon $(C_5H_5)^-$:



Acetilen lako polimerizuje, pri čemu formira sloj polimera na tarnim površinama, koji smanjuje trenje. Drugi detalji u vezi delovanja koncepta negativnih jona radikala organo-sumpornih jedinjenja na visokim pritiscima dati su u referenci [6].

Prema istraživanjima [34-39], svaki mehanizam kojim se pokušava objašnjavanje anti-habajućih procesa organo-sumpornih jedinjenja, mora uzeti u obzir sledeće eksperimentalne nalaze:

- U testovima habanja formira se momentalni sulfid (FeS) na površini.
- Površinska koncentracija sulfida je konstantna tokom perioda uhodavanja pod srednjim opterećenjem, kao i tokom samog testa habanja pod velikim opterećenjem, ali je različita za svaki aditiv.
- Površinska koncentracija sulfida na kraju testa habanja inverzno je proporcionalna iznosu habanja izmerenom tokom testa.
- Granični sloj maziva mora se neprestano obnavljati tokom testa da bi se održao konstantan intenzitet habanja.

(v) Koncentracija površinskog klizanja može se smanjiti prisustvom drugih aditiva.

Mehanizam predložen u [34,35] uskladjen je sa prethodnim eksperimentalnim nalazima u vezi interakcije anti-habajućih aditiva i tarne površine. Taj mehanizam može se izraziti sledećim jednačinama:

- Anti-habajući aditiv (A_a) + Površina (S_s) \longrightarrow Adsorbovani anti-habajući aditiv ($A_a:S_s$)
- $A_a:S_s \longrightarrow$ Površinski sulfid (S^{-2}) + Produkt reakcije je (R_p)
- $A_a + S_s \longrightarrow S^{-2} + R_p$
- Drugi aditiv (O_a) + $S_s \longrightarrow$ Adsorbovani drugi aditiv ($O_a:S_s$)
- S^{-2} Razaranje površinskog sulfida S_s + Opiljci

Jednačine (a) i (b) opisuju ravnotežnu adsorpciju praćenu reakcijom adsorbovanog aditiva. Jednačina (c) predstavlja direktnu reakciju između aditiva i površine. Do ove reakcije treba da dodje prevashodno izvan kontaktne zone [35]. Jednačina (d) opisuje interferenciju drugog aditiva sa adsorpcijom anti-habajućeg aditiva putem takmičenja za raspoložive delove površine. Poslednja jednačina predstavlja tarnu površinu i stvaranje čestica tokom trenja.

Koristeći mehanizam reakcije negativnih jona radikala organo-sumpornih aditiva, može se upotpuniti model anti-habajućih aditiva 34, 35 i prikazati sledećim jednačinama:

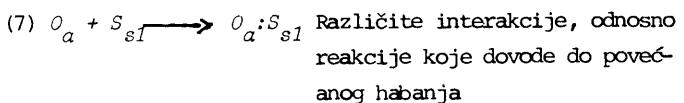
- Fizisorpcija $A_a + S_{s1} \longrightarrow A_a:S_{s1}$
- Površinska hemisorpcija (mehanizam radikala)
 - $A_a + S_h$ (toplo mesto) $\longrightarrow S_h^- (A_a-R) + R^\bullet$
 - Površinska reakcija mehanizmom radikala
 - $A_a + S_h \longrightarrow S^{-2} + R_p$
- Hemisorpcija na metalnim opiljcima (mehanizam radikala)
 - $A_a + M_D^*$ (aktivirani opiljci) $\longrightarrow M_D^- (A_a-R) + R^\bullet$
 - Reakcija na opiljcima (mehanizam radikala)
 - $A_a + M_D^* \longrightarrow S_{M_D}^{-2} + R_p$
- Površinska hemisorpcija (anjonski mehanizam) tokom klizanja

$$A_a:S_{s1} \longrightarrow S_{s2}^+ + A_a^- \longrightarrow S_{s2}^- (A_a-R) + R^\bullet$$
- Površinska reakcija (anjonski mehanizam) tokom klizanja

$$S_{s2}^- (A_a-R) \longrightarrow S^{-2} + R^\bullet$$
- Uklanjanje površinskog sulfida tokom trenja

$$S^{-2} \longrightarrow S_h^- + D + M_D^*$$

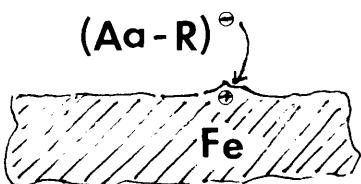
$$S_h^- \longrightarrow S_{s2}^+ + D + M_D^*$$



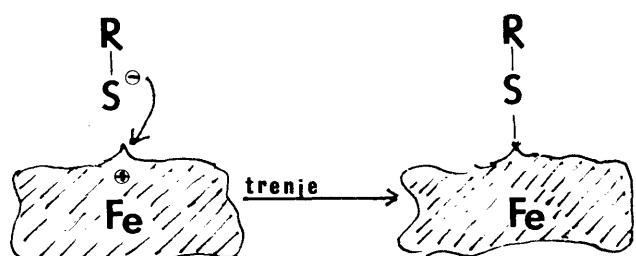
Jednačina (1) predstavlja proces u kojem se aditiv (A_a) podvrgava reverzibilnoj adsorpciji na nekoj tački površine (S_{s1}). Tim procesom formira se adsorbovani sloj koji smanjuje habanje tokom graničnog klizanja. Izdržljost adsorbovanog sloja zavisi od hemije aditiva. Površinska hemija definiše količinu i aktivnost površinskih tačaka S_{s1} i predviđa interakciju između njih i molekula aditiva. Osnovano je pretpostaviti da ta adsorpcija najverovatnije nastaje tokom vremena kada se klizne površine nalaze u kontaktu sa masom maziva. Jednačine (2), (3) i (4) prikazuju hemisorpciju i reakciju molekula aditiva tokom klizanja. Jednačine (2) i (3) predstavljaju procese radikala prouzrokovane visokim pritiscima i temperaturama. Može se prepostaviti da se procesi hemisorpcije i reakcije dešavaju takođe i sa aktiviranim metalnim opiljcima (M_D^+) - jednačina (3). Opiljci tipa $M_D^- (A_a - R)$ i $S_{M_D}^{+2}$ npr. sa hemisorbovanim aditivom i čestice metal sulfida mogu da formiraju međusupstancu (interface). Jednačina (4) prikazuje proces hemisorpcije prouzrokovani emisijom egzoelektrona i stvaranjem pozitivno nanelektrisanih pega S_{s2}^+ , obično na vrhovima neravnina,



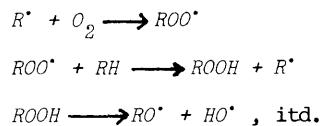
koje reaguju sa negativnim jonom molekula aditiva.



Hemisorbovan sloj proizvodi stabilniju prevlaku protiv habanja. Na primer, joni RS treba da se hemisorbuju kako sledi:



Ako je smicajna otpornost visoka, ona može da prouzrokuje kidanje hemijskih veza hemisorbovanih molekula aditiva. Ovaj proces (jednačina 5) proizvodi nove radikale R^\bullet i formira prevlaku od metal sulfida koja sprečava zaribavanje. Radikali mogu da izazovu formiranje frikcijskih polimera, koji oksidišu u prisustvu kiseonika:



Radikali posle ovih reakcija i ili rekonbinacija formiraju proekte reakcije R_p . Jednačina (6) prikazuje habanje i razaranje površinskih sulfidnih prevlaka. Pošto nemetalne površine u uslovima trenja mogu takođe da emituju elektrone, reakcije uništavanja površinskih sulfida mogu da proizvedu pozitivno nanelektrisane pege (S_{s2}^+) i aktivirane površinske pege (S_h). Ove druge mogu da adsorbuju A_a lakše nego u jednačini (1). Pege S_{s2}^+ izazvaju formiranje novog metalno-organskog sloja, koji će posle razbijanja veza hemisorbovanih molekula (jednačina (5)), npr. deterđentno-disperzivni aditivi, anti-habajuće dejstvo A_a , a naročito cink-dialkilditiofosfata, postaje inferiorno.

Anti-habajuće dejstvo aditiva koji sadrže sumpor je veoma kompleksno u prisustvu drugih aditiva (jednačina (7)), mada se može očekivati da opšte reakcije protiču na tri nivoa |40|:

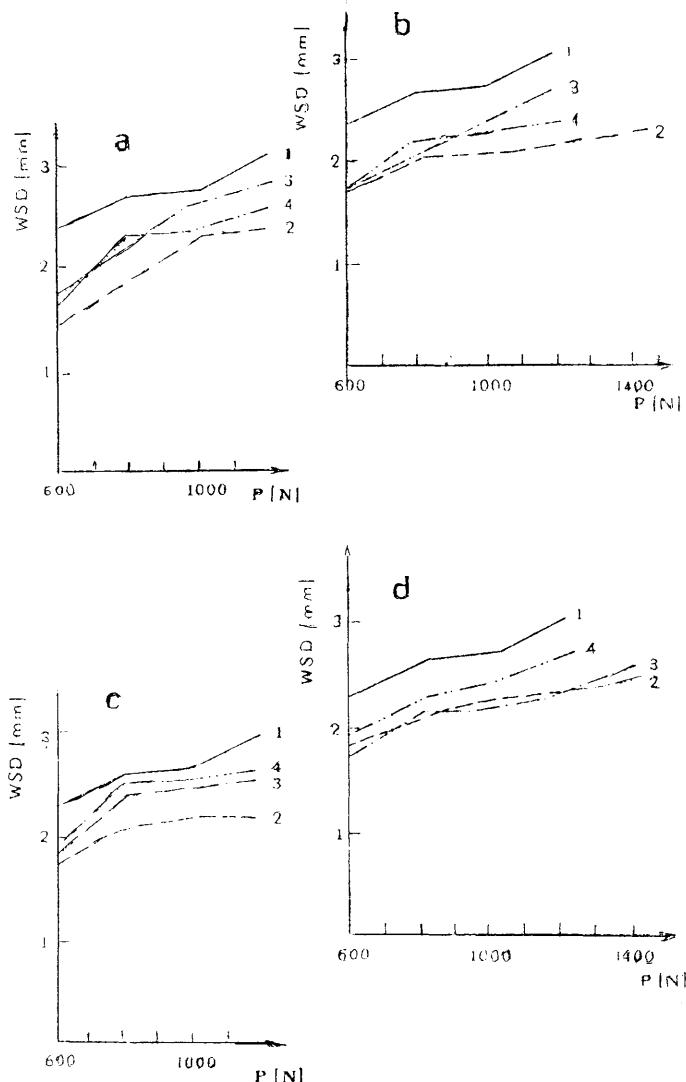
- hemijska reakcija između molekula dva aditiva u uljni fazi, pre rada
- takmičenje u procesima adsorpcije aditiva prema metalnim površinama, što rezultira pojmom različitih površinskih produkata pre rada
- promene u procesima formiranja prevlaka, što dovodi do važnih modifikacija u anti-habajućoj efikasnosti.

Masne kiseline i masni alkoholi

U opštem slučaju, tečne masne kiseline su efikasnije kao granična maziva nego masni alkoholi sa sličnim brojem ugljenikovih atoma u molekulu. Kada se primenjuju u vidu debelih, čvrstih, prevlaka, trenje je skoro isto za dugolančane alkohole i masne kiseline. Dakle, kako se može objasniti slično ponašanje ovih jedinjenja u režimu mešanog trenja (sl. 5), kada se ovi aditivi primenjuju kao debele prevlake?

Reakcija masnih kiselina sa metalnom površinom proizvodi polimolekularni sapunski sloj. Otpornost sloja formiranog od alifatičnih kiselina zavisi od dužine ugljeničnih lanaca, pri čemu veće dužine lanaca odgovaraju

boljem podmazivanju [42]. Međutim, u literaturi je objavljeno da pri višim temperaturama (50°C), kiselina sa



Sl. 5: - Prečnik zone habanja u funkciji opterećenja za *n*-decil alkohol (a), *n*-cetyl alkohol (b), lauričku kiselinu (c) i palmitinsku kiselinu (d); 1 - bazno ulje (BO), 2 - 0,5%, 3 - 1,5% i 4 - 3% gornjih jedinjenja u BO [41]

kraćim lancima daju manji koeficijent trenja [43]. Značaj koloidalnog aspekta međupovršinskih proizvoda formiranih od masnih kiselina obradjen je u [44]. Uticaj dužine lanaca alifatičnih kiselina na nosivost prikazan je u radovima [45-46], gde se tvrdi da je sparivanje dužina lanaca kiseline i bazne materije važno za dobro podmazivanje, najverovatnije zbog povećane debljine sloja i njegove izdržljivosti.

U radu [4], proučavano je ponašanje masnih kiselina kao aditiva mazivima u funkciji sastava baznog ulja, atmosfere, dužine lanca i koncentracije kiseline. Demonstrirano je da prisustvo aromata u baznom ulju dovodi do

ozbiljnih oštećenja kontaktnih elemenata, čak i u uslovima lakog opterećenja. U radovima 4,7 predložen je mehanizam površinskog zamora, kojim se objašnjava mazivost kiselina u baznim uljima sa aromatima u redukovanim atmosferama. Model se zasniva na pretpostavci da se na tarnim površinama formiraju karboksilatni anjoni koji zasnavaju rast prskotina, dok ciklično naprezanje pokretnog dela koje nastaje prilikom procesa klizanja prouzrokuje brzo širenje prskotine.

Ovaj podmazujući mehanizam masnih kiselina generalno objašnjava njihovo ponašanje u aromatičnom baznom ulju. Međutim, on ne objašnjava na zadovoljavajući način formiranje anjona radikala karboksilata. Tu pojavu je potrebno bolje objasniti i razraditi. Potrebno je objasniti i dejstvo egzoelektrona na masne kiseline. U cilju objašnjavanja nekih detalja hemijskih reakcija kojima masne kiseline i masni alkoholi smanjuju trenje, u ovome radu predlaže se mehanizam reakcije podmazivanja negativnih jona radikala ovih jedinjenja.

U okviru ovoga mehanizma moguće je lako objasniti slično ponašanje masnih kiselina i masnih alkohola tokom klizanja. Kao što je pokazano u tabelama 4 i 5, oba tipa jedinjenja uglavnom ionizuju u skladu sa mehanizmom disocijativnog rezonantnog zahvata, proizvodeći odgovaraju-

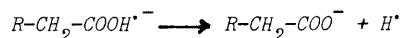
TABELA 4. - Vrsta i intenzitet negativnih jona masnih kiselina [21]

Masna kiselina	Intenzitet jona, %		
	\bar{M}^-	$(\bar{M}-1)^-$	$(\bar{M}-3)^-$
$\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$	20.1	100	6.8
$\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$	18.5	100	5.5
$\text{C}_{19}\text{H}_{39}\text{COOH}$	22.1	100	4.0

TABELA 5. - Vrsta i intenzitet negativnih jona masnih alkohola [21]

Masni alkoholi	Intenzitet jona, %				
	\bar{M}^-	$(\bar{M}-1)^-$	$(\bar{M}-2)^-$	$(\bar{M}-3)^-$	$(\bar{M}-5)^-$
$n\text{-C}_{14}\text{H}_{29}\text{OH}$	5.0	40.7	18.1	100	5.0
$n\text{-C}_{16}\text{H}_{33}\text{OH}$	8.7	50.6	16.5	100	5.7
$n\text{-C}_{18}\text{H}_{37}\text{OH}$	10.0	45.0	23.8	100	6.5

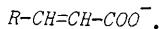
će anjone i radikalne anjone. Osnovni proces razlaganja masnih kiselina je kidanje O-H veze:



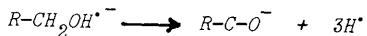
Dalji proces razlaganja ovih jona ide putem otkidanja dva vodonikova atoma od alfa-ugljenika i prenosa u karboksilatnu grupu:



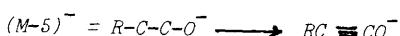
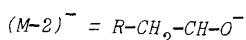
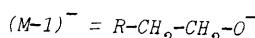
Ovaj mehanizam je dokazan korišćenjem deuterizovanih jedinjenja 21. Potrebno je napomenuti da je broj biradikalnih jona $R-COO^-$ vrlo mali (tabela 4). Ovi biradikalni joni mogu se rekombinovati, formirajući ukrštene veze oblika nezasićenih karboksilatnih anjona:



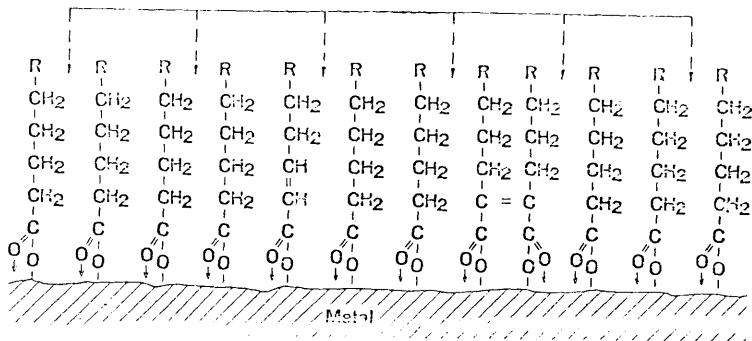
Osnovni proces razlaganja masnih alkohola ide putem otkidanja tri vodonikova atoma (tabela 5):



Medutim, anjoni $(M-1)^-$, $(M-2)^-$ i $(M-5)^-$ prisutni su u relativno velikim količinama. Struktura ovih jona može se predstaviti kako sledi:

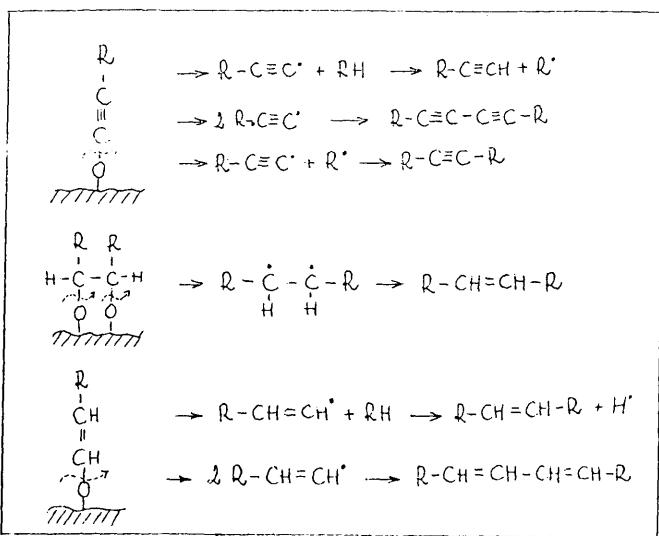


KOHEZIJA



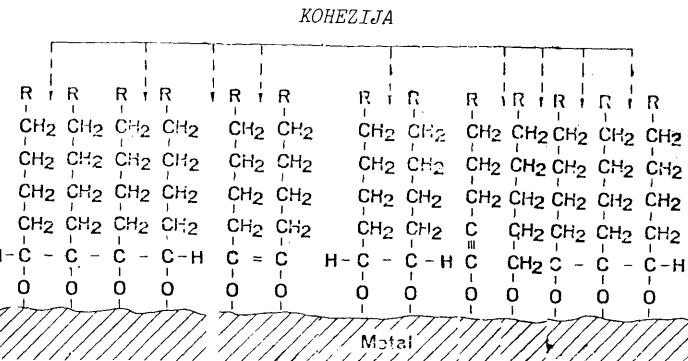
Sl. 6. - Model hemisorpcije masnih kiselina tokom trenja metala

deli hemisorpcije ovih jedinjenja, prouzrokovane kliznjem (sl. 6 i 7). Takvo stanje kod kiselina (sl. 6) prućeno je povoljnijom adsorpcijom u poređenju sa alkoholima. Bolja polarnost kiselinskih molekula kompenzira biradikalnu rekombinaciju alkoholnih molekula. Jioni $(M-5)^-$ su retki, pa zato i nema mogućnosti za njihovu rekombinaciju posle hemisorpcije. Ovi joni najverovatnije nastaju u obliku alkinih jedinjenja (sl. 7), slično alkenim jedinjenjima formiranim od $(M-3)^-$ - jona masnih kiselina (sl. 6). Drugim rečima, bolje povezivanje $-COO^-$ grupa sa metalnom površinom kompenzira se ukrštenim vezama $-CH_2-C-O^-$ grupa u alkoholima.



Sl. 8. - Šematska reprezentacija formiranja alkina, dialkina, alkena i dialkena od različitih vrsta hemisorbiranih anjona dobijenih iz alkohola

Jedna od najvažnijih osobina mehanizma dejstva masnih kiselina i masnih alkohola prema predloženom modelu podmazivanja je rekombinacija njihovih hemisorbiranih radikalnih anjona u cilju formiranja ukrštenih ili nezasićenih veza. Ako je smicajni napon visok (povišene temperature), on može da prouzrokuje dalje formiranje i desorpciju sapuna ili kidanje hemijskih veza hemisorbiranih alkohola proizvodeći alkine, dialkine, alkene i dialkene. Reakcije stvaranja ovih jedinjenja ilustrovane su na sl. 8.



Sl. 7. - Model hemisorpcije masnih alkohola pri frikciiji metala

Uzimajući u obzir specifičnosti procesa razlaganja masnih kiselina i masnih alkohola, mogu se predložiti mo-

Prema tome, predloženi model dobro objašnjava rezultate objavljeni u [47].

ZAKLJUČCI

U radu je diskutovan model podmazivanja negativnih jona radikala. Taj mehanizam se zasniva na ionizaciji jedinjenja maziva izazvanoj egzoelektronima. Model dobro objašnjava mnoge podmazujuće fenomene ugljovodonika i mnogih hemikalija koje se koriste kao aditivi. Predloženi mehanizam komplementira druge modele podmazivanja.

LITERATURA

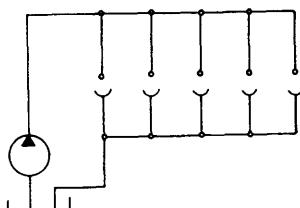
- [1] GOLDBLATT, I.L., Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Develop. Vol. 10, p.270/1971.
- [2] RABINOVITCH, A.M., BORTCHEVSKIY, S.B., BESLUSKAJA, R.W., "Advances in Additives for Lubricating Oils", Moscow, p.74, 1977. in Russian.
- [3] GRUNBERG, L., Proc. Phys. Soc. Sect. B, Vol. 66, p. 153, 1953.
- [4] GOLDBLATT, I.L., ASLE Trans. Vol. 16, p.150, 1973.
- [5] KAJDAS, Cz., Wear Vol. 101, p.1, 1986.
- [6] KAJDAS, Cz., ASLE Trans. vol. 29, p.21, 1985.
- [7] GOLDBLATT, I.L., "Microscopic Aspects od Adhesion and Lubrication (Editor: J.M. Georges), Tribology Series Vol. 7, Amsterdam, p.521, 1983.
- [8] MARCH, P.A., RABINOWICZ, E., ASLE Trans. Vol. 20, p. 315, 1977.
- [9] KRAMER, J., "Dear metallische Zustand", Goettingen, 1950.
- [10] GRUNBERG, L., Brit. J.App. Phys. Vol. 9, p.85, 1958.
- [11] VERMAN, C., Materials Science and Eng., vol. 4, p. 329, 1969.
- [12] VROTZEN, F., Phys. Stat. Sol., Vol. 22, p.9, 1967.
- [13] MOORE, J., TSANG, S., STP 515, ASTM, p.113, 1972.
- [14] BAXTER, W., Vacuum, Vol. 22, p.571, 1974.
- [15] FERRANTE, J., ASLE Trans., Vol.20, p.328, 1977.
- [16] SCHARMANN, A., KRIEGSEIS, W., "Microscopic Aspects of Adhesion and Lubrication", Editor, Georges, J.M., Tribology Series, Vol.7, Amsterdam, p.489, 1983.
- [17] RAMSEY, J.A., Surface Sci., Vol.8, p.313, 1967.
- [18] CHAIKIN, S.W., Wear, Vol. 10, p.49, 1967.
- [19] JAMMET, A.E., Inst. Mech. Engns Tribology Convention, Report Paper 2, Gothenburg, 1969.
- [20] MOULD, R.W., SILVER, H.B., SYRETT, R.J., WEAR, Vol. 26, p.27, 1973.
- [21] von ARDENNE, M., STEINFELDER, K., TUEMLER, R.: "Elektronenanlagerungs-Massenspektrographide organischer Substanzen", Berlin, 1971.
- [22] APPELDORN, J.K., TAO, F.F., Wear, vol. 12, p.117, 1968.
- [23] FEIN, R.S., KREUZ, K.L., ASLE Trans. Vol. 8, p.29, 1965.
- [24] TAO, F.F., APPELDORN, J.K., ASLE Trans., Vol. 11, p.345, 1968.
- [25] GOLDMAN, I.B., APPELDORN, J.K., TAO, F.F., ASLE Trans., Vol. 13, p. 29, 1970.
- [26] ALLUM, K.G., FORD, J.F., J. Inst. Petrol, Vol. 51, p.145, 1965.
- [27] ALLUM, K.G., FORBES, E.S., J. INST. Petrol, Vol.53, p.174, 1967.
- [28] FORBES, E.S., REID, A.J. D., ASLE Trans, Vol. 16, p.50, 1973.
- [29] FORBES, E.S., Wear Vol. 15, p.87, 1970.
- [30] VINOGRADOVA, T.E., "Antiwear Additives Used in Lubricating Oils", Moscow, 1972, (in Russian).
- [31] BOVINGTON, C.H., DACRE, B., ASLE Trans., Vol. 25, p.267, 1982.
- [32] DACRE, B., BOVINGTON, C.H., ASLE Trans. Vol. 25, p. 272, 1982.
- [33] KAJDAS, C.Z., DOMINIACK, M., FIRKOWSKI A., DABROWSKI, J.R., MISTERKIEWICZ, B., ASLE Trans., Vol. 26, p.11, 1983.
- [34] BALDWIN, B.A., ASLE Trans., Vol. 26, p. 37, 1983.
- [35] BALDWIN, B.A., ASLE Trans., Vol.26, p.445, 1983.
- [36] BALDWIN, B.A., Lubr. Eng. Vol. 32, p.125, 1975.
- [37] BALDWIN, B.A., ASLE Trans. Vol. 19, p.335, 1976.
- [38] BIRD, R.J., GALVIN, G.D., Wear Vol. 37, p.143, 1976.
- [39] HOLINSKI, R., Lubr. Eng. Vol. 36, p. 530, 1980.
- [40] KAPSA, P.H., MARTIN, J.M., BLANC, C., GEORGES, J.M., ASME Trans. Vol. 103, p.486, 1981.
- [41] HEBDA, M., WACHAL, A., "Trybologia", Warszawa, p.264, 1980.
- [42] ZISMAN, W.A., "Friction and Wear", Editor R.V. Davies, Amsterdam, 1959.
- [43] SUBBA RAO, M.S., DESPHONDE, P.K., KULOOOR, N.R., Indiana J. Tech., Vol. 3, p.-22, 1965.
- [44] MATHIA, T., These d'Etat No.7845, Lyon, 1978.
- [45] ASKWITH, T.C., CAMERON, A., CROACH, R.F., Proc. Roy. Soc. Vol. A291, p.500, 1966.
- [46] GREW, W., CAMERON, A., Nature, Vol.214, p.429, 1967.
- [47] STINTON, H.C., SPIKES, H.A., CAMERON, A., ASLE Trans. Vol. 25, p. 355, 1982.

V. SAVIĆ

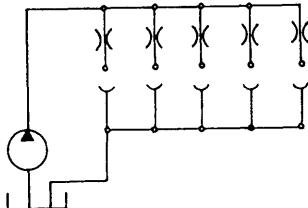
Sistemi za kontinuirano podmazivanje (I DIO)

Konstruktivne karakteristike

Sistemi za kontinuirano podmazivanje su takvi kod kojih se razvod ulja vrši preko pomoćnih cjevovoda ili razvodnih elemenata, koji obezbeđuju stalni dotok ulja u mazno mjesto. Mogu biti protočni, ako se ulje nakon obavljenog podmazivanja ne vraća u rezervoar i cirkulacioni ako se ulje vraća u rezervoar. Protočni i cirkulacioni sistemi su iste konstrukcije, uz napomenu da cirkulacioni imaju ugradjen povratni cjevovod. U klasifikaciji se nazivaju opštim imenom sistem sa prigušnicama, iako postoji više varijantnih rješenja. Na sl. 1. su prikazane šeme karakterističnih varijantnih rješenja: sistem sa slobodnim razvodom (a), sistem sa prigušnicama (b), sistem sa ventilima (c) i sistem sa razvodnicama (d).



a) Sistem sa slobodnim razvodom

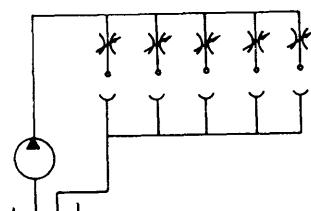


Kod sistema sa slobodnim razvodom (sl. 1a), ulje se od glavnog voda razvodi pomoćnim cjevovima, koje su po pravilu manjeg prečnika od glavnog, magistralnog voda. Nedostatak ovih sistema je što se maznim mjestima, koji su bliži pumpi, odvodi veća količina ulja, jer je pritisak ulja veći, a udaljenijim mjestima se dovode manje količine ulja, jer je na kraju glavnog voda pritisak niži nego na početku. Da bi se taj nedostatak eliminisao, ugradjuju se pumpe većeg kapaciteta nego je to stvarno potrebno, ili se pomoći cjevovodi, od glavnog voda do maznog mesta, ugradjuju sa različitim prečnicima. Blizi pumpi su sa manjim prečnikom, a oni udaljeniji od pumpe su sa većim prečnikom. Na taj način se približno izjednačavaju hidraulički otpori do svih maznih mesta, te se dobija približno ujednačena distribucija ulja od maznih mesta. Kako su pomoći cjevovodi različite dužine i konfiguracije, različiti su i suprostavljajući otpori, te je veoma teško dobiti optimalnu preraspodjelu ulja.

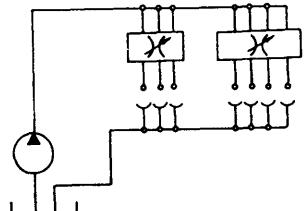
Sistemi sa prigušnicama (sl. 1b) su veoma slični prethodnim. Na svakom pomoćnom cjevovodu je postavljena mlaznica sa konstantnom površinom svjetlog otvora. Mogu se ugraditi mlaznice različitog prečnika otvora, te je u odnosu na veličinu pritiska ispred nje moguće odrediti približno tačnu količinu ulja koja će se propustiti prema maznom mjestu.

Umjesto mlaznice konstantnog presjeka (sl. 1c), moguće je na cjevovode ugraditi elemente čija se površina svjetlog otvora može podešavati. Podešavanjem površine svjetlog otvora na svim ugradjenim ventilima moguće je postići približno tačno, potrebljujući preraspodjelu ulja svakom maznom mjestu posebno.

Ako se veći broj elemenata kod kojih se površine svjetlog otvora mogu podešavati, objedine u jedan razvodni element, i ugraditi u sistem podmazivanja, dobije se sistemi sa razvodnicama (sl. 1d).



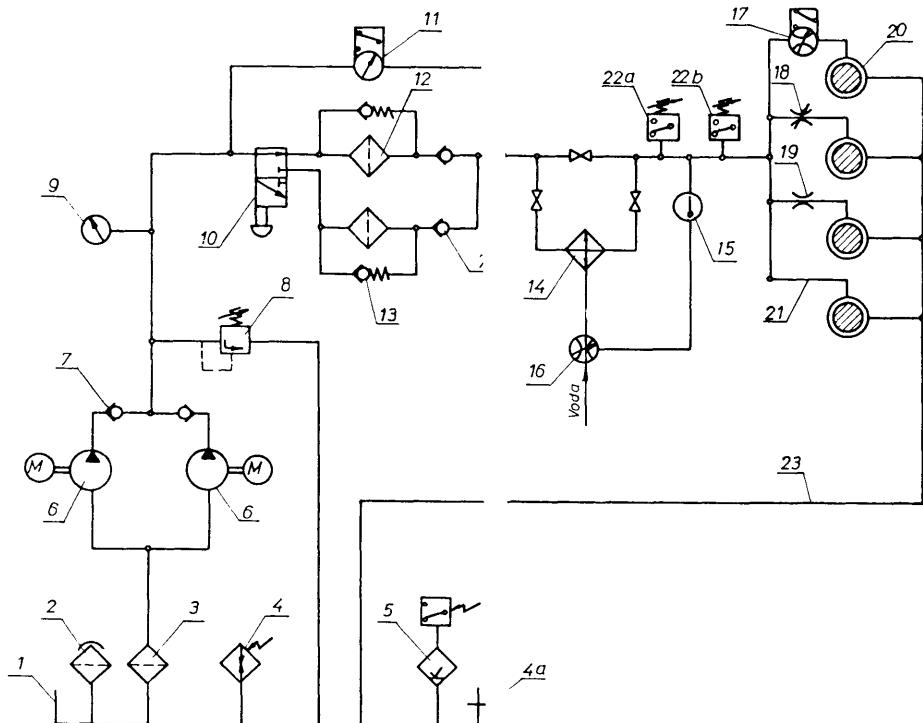
c) Sistem sa ventilima



d) Sistem sa razvodnicama

Sl. 1. - Cirkulacioni sistemi za kontinuirano podmazivanje

U sve četiri vrste sistema za kontinuirano podmazivanje se ugradjuju elementi za prečišćavanje, hlađenje i zagrijavanje ulja, elementi za regulaciju pritiska i elementi za kontrolu protoka i pritiska. Izvedbe mogu biti veoma različite, ovise uglavnom od uslova eksploatacije i zahtjeva postrojenja za uljem odredjene čistoće, temperature, pritiska i količine, te potrebnog stepena kontrole navedenih parametara. Na sl. 2 je prikazana šema sistema za kontinuirano podmazivanje, sa ugradjenim elementima kontrole i regulacije, te odvodom ulja prema maznom mjestu preko cjevovoda (21), ulaznicu konstantnog otvora (19), regulacionog ventila (18) i regulacionog ventila sa električnom kontrolom protoka (17).



Sl. 2. - Šema cirkulacionog sistema za kontinuirano podmazivanje uljem

Ugradjene su dvije pumpe (6) jedna je radna, a druga je rezervna. Ulje usisavaju iz rezervoara (1), preko usisnog filtera (3). U rezervoaru su postavljeni električni grijač (4), koji ima zadatku da prije puštanja sistema u rad ulje zagrije na određenu temperaturu, i kontrolnik (5) nivoa ulja, koji daje informacije o nivou uljnog punjenja. Kontrola pritiska se vrši preko dva tlacična prekidača koji su ugradjeni na glavnom vodu. Tlačni prekidač (22a) kontrolira najnižu, a prekidač (22b) naj-

višu dozvoljenu vrijednost radnog pritiska ulja. Konstrukcijom elektro upravljanja sistema i mašine, moguće je usloviti rad maštine kada:

- ulje nije zagrijano na određenu temperaturu (4a),
- je nivo ulja opao na minimalnu veličinu (5),
- je došlo do zasićenja filtera (11),
- nije dostignut potreban pritisak ulja u glavnem vodu (22a),
- pritisak je dostigao najvišu dozvoljenu veličinu (22b),
- u mazno mjesto se ne potiskuje potrebna količina ulja (17).

Radna ili rezervna pumpa (6), potiskuje ulje preko nepovratnog ventila (7) u glavni vod. Kod izvedbe pogonskog agregata sa ugradjene dvije pumpe i uslova da se uključenje u pogon radne ili rezervne pumpe vrši automatski, neophodna je ugradnja nepovratnih ventila. Naime u sistemu su ugradjene zapreminske pumpe, koje bi u slučaju dovođa ulja sa potisne strane radile kao hidraulični motori pa bi se ulje preko njih vraćalo u rezervoar.

Najviši radni pritisak pumpe se određuje podešavanjem ventila za regulaciju pritiska, koji u ovom slučaju ima funkciju sigurnosnog ventila. Podešena vrijednost pritiska na ventilu (8) se u normalnom radu ne bi trebalo nikada postići, jer je on podešen na nešto veću vrijednost, od normalne veličine radnog pritiska. Svojstvo zapreminskih pumpi je da rade sa pritiskom koji je jednak veličini ukupnih suprotstavljujućih otpora tečenja fluida. One, bez obzira na veličinu radnog pritiska, koji može biti mnogo manji od maksimalno mogućeg kojeg pumpa

može da razvije, imaju uvijek konstantan kapacitet. U slučaju da se u instalaciji sistema za podmazivanje pojavi iznenadni otpor kretanju ulja, na primjer pad temperature pa zbog toga raste viskoznost, začepljenje cjevovoda ili nepredviđeno suprotstavljanje ulasku ulja u mazno mjesto, radni pritisak pumpe raste. Kada dostigne vrijednost podešenu na ventilu (8), on se otvara i štiti instalaciju od razaranja. Sada će u sistemu u svim tač-

ana vladati pritisak, koji je upravo jednak veličini po-dešenog pritiska na sigurnom ventilu (8). Ovako visoko dostignuti pritisak se može signalizirati preko elektro-hidrauličnog tlacičnog prekidača (22b).

Odmah iza pumpe se postavljaju uređaj za prečišćavanje ulja-filteri. Ovisno o zahtjevima postrojenja i stepenu kontaminacije ulja sa mehaničkim nečistoćama, može se postaviti jedan ili dva filtera. Kod sistema koji je prikazan na sl. 2, postavljena su dva filtera (12) sa ugradjenim nepo-ratnim ventilima (13) preko kojih se, u slučaju zasićenja filtera mehaničkim nečistoćama, nefiltrirano ulje potiskuje prema maznim mjestima. To se registruje i signalizira preko diferencijalnog manometra (11), koji registruje poremećaj razlike pritiska ispred i iza filtera. Usmjeravanje toka prema jednom ili drugom filteru se vrši preko ručnog ventila (10).

Osim podmazivanja, ulje obavlja i funkciju hladjenja postrojenja, što znači da ulje postepeno akumulira odredjenu količinu toplote, pa mu raste temperatura. Kada ona ima tendenciju porasta preko 50°C , neophodno ga je hladiti preko hladnjaka (14). Temperatura ulja se kontroliše preko termometra (15), koji daje signal ventilu (16) o potreboj količini vode koja se treba propustiti prema hladnjaku. To predstavlja racionalno rješenje, jer se na taj način potrošnja vode za hladjenje, znatno smanjuje. U zimskom periodu, su zračenja toplote u okolini znatno veća nego u ljetnom periodu, pa ukoliko se ulje ne zagrijava omogućeno je proticanje ulja obilaznim vodom direktno prema maznim mjestima.

Pritisak ulja u glavnom vodu se očitava na manometru (9), a kontroliše se preko hidrauličnih tlacičnih prekidača (22a i 22b). Preko njih se može signalizirati maksimalni ili nedovoljno visok pritisak koji obezbjedjuje nesmetan rad postrojenja.

Nakon obavljenog podmazivanja elemenata (20) čije se površine nalaze u kontaktu i procesu relativnog kretanja, ulje se slobodnim padom vraća u rezervoar povratnim cjevovodom (23).

Pogonski agregat

Pod pogonskim agregatom se podrazumjeva sklop rezervoara, pumpe i ostalih pripadajućih pomoćnih uređaja. Na sl. 3. je prikazan presjek (a) i izgled tipičnog pogonskog agregata (b) sistema za podmazivanje.

Konstrukcija i dimenzionisanje rezervoara za ulje su veoma važni za ispravno funkcioniranje sistema za podmazivanje i održavanje uljnog punjenja. U rezervoaru se obavljaju značajne radnje kao što su: akumuliranje potrebne količine ulja, izdvajanje nečistoća i vode, obavlja se proces izdvajanja vazduha iz ulja, u njemu se ulje

zagrijava ili hlađi na radnu temperaturu i drugo. Da bi se obavile sve funkcije, neophodno je da rezervoar bude pravilno dimenzionisan, konstruisan i snabdjeven sa odgovarajućim pomoćnim uređajima.

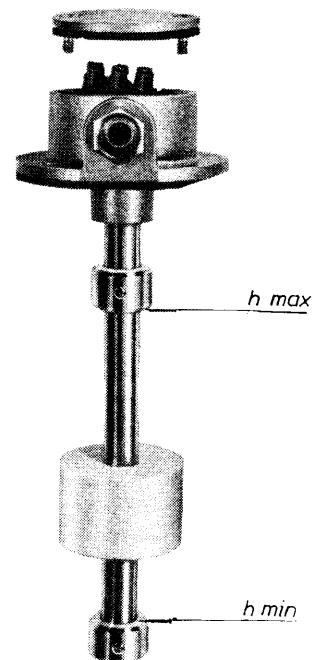
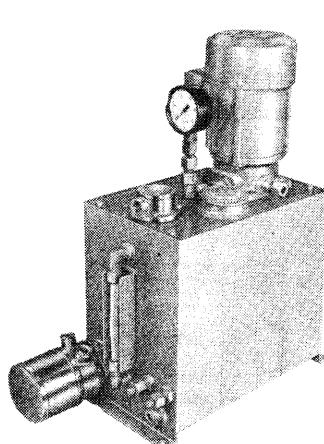
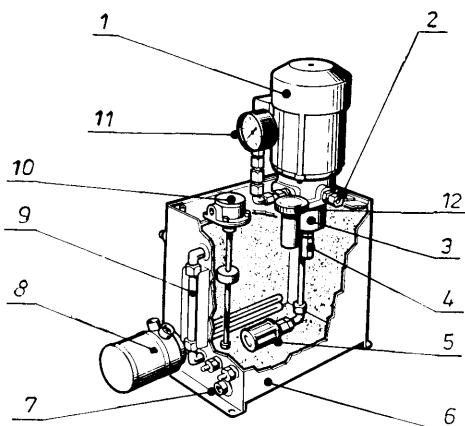
Volumen rezervoara se dimenzioniše u odnosu na veličinu minutnog kapaciteta pumpe i vrste postrojenja koje se podmazuje. Najčešće se kreće u granicama 10-50 kapaciteta pumpe u minuti. Kod upotrebe pumpi manjeg kapaciteta koeficient optoka je veći. Isti je slučaj kod sistema, kada je intenzivna kontaminacija ulja sa vodom i nečistoćama. Karakteristike i zahtjevi postrojenja, imaju takodje uticaj na veličinu rezervoara. Tako, valjanočka postrojenja imaju veće koeficiente optoka, a turbinska postrojenja manji. Volumeni rezervoara cirkulacionih sistema se inače nalaze u veoma širokim granicama. Kreću se od 5-100.000 litara. Radni nivo ulja u rezervoaruu se kreće u granicama koje su odredjene najnižim i najvišim dozvoljenim nivoom. Kako se u rezervoaru obavljaju i funkcije taloženja vode i čvrstih primjesa, kao i izdvajanje vazduha iz ulja, može se zaključiti da je u eksploataciji neophodno obezbjediti radni nivo ulja bližu maksimalnog. Ovo je važno i zbog održavanja uljnog punjenja, jer se manje količine ulja mehanički i termički opterećuju, pa mu se vijek trajanja progresivno smanjuje. Nivo ulja se kontroliše vizuelno preko uljokaznog stakla ili preko električnih kontrolnika nivoa. Izgled kontrolnika nivoa sa magnetnim prstenom, za kontrolu tri nivoa ulja je prikazan na sl. 4.

Na sl. 5. je prikazana šema presjeka rezervoara, sa naznačenim osnovnim karakterističnim veličinama. Naznačene veličine se prilikom izrade konkretnog rješenja mogu uzeti kao polazni elementi.

Usisavanje i potiskivanje ulja prema maznim mjestima se vrši preko pumpe. Za transport ulja se koriste isključivo zapreminske pumpe, a u sistemu za podmazivanje se najčešće ugradjuju zupčaste pumpe sa vanjskim ozubljenjem. U sistemima sa manjim potrebnim kapacitetom pumpe ugradjuju se zupčaste pumpe sa unutarnjim ozubljenjem.

Na sl. 6. je prikazan presjek zupčaste pumpe. Sastoji se od pogonskog (1) i pogonjenog (2) zupčanika, bočnih strana kućišta (3 i 5) i čeonog vijenca (4). Za vrijeme rotacije pogonskog i pogonjenog zupčanika, stvara se podpritisak u slobodnim medjuzubljima, čija je zapremina ograničena površinama zuba, čeonom i bočnom stranom kućišta, pa dolazi do usisavanja i punjenja uljem, pomenutih volumena medjuzublja. Ono se u medjuzubljima transportuje, po krugu rotacije do potisne strane pumpe.

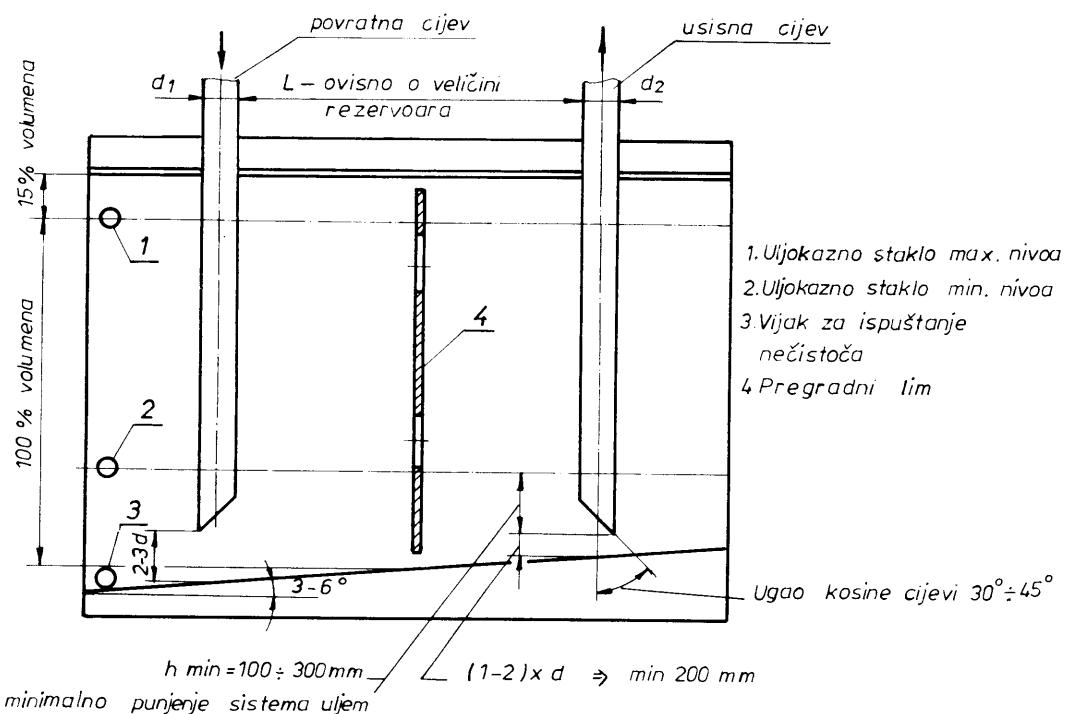
Zupčaste pumpe se inače odlikuju jednostavnom konstrukcijom, malom težinom i niskom cjenom izrade. Nedostatak im je što, zbog djelovanja sile pritiska preko zupč



Sl. 3. - Pogonski agregat

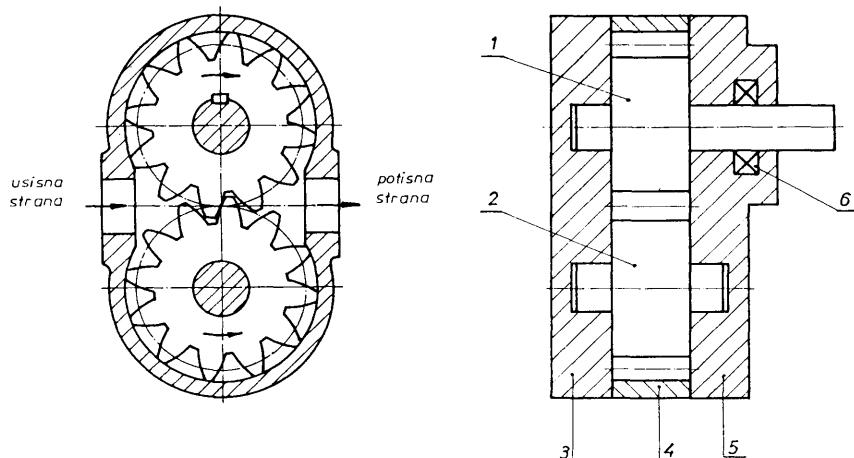
1-elektromotor, 2-priključak tlačnog voda, 3-pumpa, 4-ventil za ograničenje pritiska, 5-usisni filter, 6-rezervoar, 7-otvor za ispuštanje ulja, 8-elekrozagrijivač, 9-uljokazno staklo, 10-kontrolnik nivoa ulja, 11-manometar, 12-otvor za usipanje ulja sa filterom

Sl. 4-Izgled magnetno-električnog kontrolnika nivoa ulja



Sl. 5 - Šema presjeka rezervoara

anika na ležajeve, imaju ograničenu mogućnost stvaranja pritiska i imaju visok stepen neravnomjernosti potiskivanja ulja u potisnu stranu. Međutim, ti nedostaci nisu bitni za rad sistema za podmazivanje, do izražaja dolaze navedene prednosti, te je to razlog zbog koga su tako često u upotrebi.



Sl. 6. - Presjek zupčaste pumpe

U instalacijama sistema za podmazivanje koriste se najčešće pumpe niskog pritiska do 20 bara, rijetko do 50 bara, i u širokom dijapazonu kapaciteta od 0,1 do 5000 l/min.

U stručnoj literaturi se može naći više pristupa proračunu kapaciteta zupčaste pumpe. Ovdje se navodi uproštena jednačina, koja definiše kapacitet pumpe, sa stepenom tačnosti koji zadovoljava zahtjeve sistema za podmazivanje. Kapacitet zapreminskih pumpi se inače uvek definiše preko vrijednosti specifičnog kapaciteta, koji predstavlja količinu fluida koga pumpa potisne u sistem u toku jednog obrtaja radnih elemenata.

$$q \approx D\pi h b = 2\pi D m b \quad [cm^3/obrtaju]$$

gdje je:

q - specifični teoretski kapacitet,

m - modul zupčanika,

b - širina zuba,

D - dijbeni prečnik pogonskog zupčanika,

$h = 2 \text{ mm}$ - visina zuba.

$$Q = q n = 2\pi D m b n \quad [cm^3/min]$$

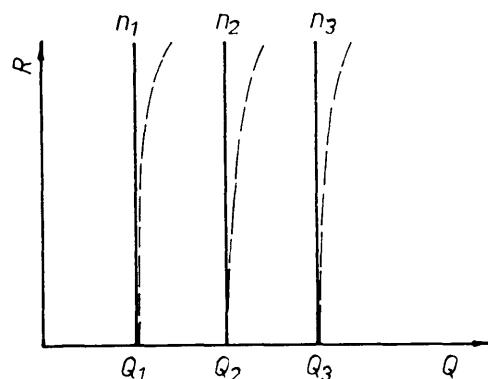
gdje je: n broj obrtaja zupčanika.

Kod pumpi sa brojem zuba $Z = 6-12$, zapremina međuzublja je veća od zapremine zuba, pa se vrijednost π ,

zamjenjuje sa koeficientom 3,5.

Gubici snage u zupčastojoj pumpi su posljedica mehaničkih i zapreminskih gubitaka. Ti gubici se određuju vrijednošću mehaničkog $m = 0,75-0,9-$ i volumetrijskog $v = 0,80-0,92$ koeficijenta iskorištenja. Navedene vrijednosti koeficijenta iskorištenja vrijede za područje rada zupčaste pumpe između minimalnog i maksimalnog broja okretaja.

Kapacitet zapreminskih pumpi je funkcija specifičnog kapaciteta radnih elemenata za jedan obrtaj i broja obrtaja u jedinici vremena u kojoj se kapacitet izražava. Za razliku od strujnih pumpi (centrifugalne pumpe), kod kojih je kapacitet promjenljiva veličina, ovisna od veličine suprotstavljućeg pritiska, kapacitet zapreminskih pumpi, to znači i zupčastih, je konstantna veličina, neovisna od suprotstavljajućeg pritiska. Ona istina ima izvjesnog uticaja, koji je vezan samo sa volumetrijskim gubicima, koji rastu sa porastom pritiska, jer se povećava i proticanje ulja kroz zazore iz strane visokog pritiska u stranu niskog pritiska. Kapacitet pumpe se grafički iskazuje preko krive ili prave linije - karakteristike pumpe, kojom se definije ovisnost kapaciteta od pritiska. Na sl. 7 je prikazana karakteristika kod zapreminskih pumpi, teoretska



Sl. 7. - Karakteristike zapreminskih pumpi

punom i stvarna crtkanom linijom, za različite vrijednosti broja obrtaja radnih elemenata.

Najmanja obodna brzina zupčanika pumpe se može odrediti po empirijskoj formuli:

$$v_{min} = 0,026 \frac{P}{V} \quad [m/s]$$

gdje je: p - radni pritisak pumpe (daN/cm^2),
 v - kinematska viskoznost (mm^2/s).

Najveća dozvoljena obodna brzina ovisi od viskoziteta ulja.

Viskozitet ulja	mm^2/s	15	35	70	150
Obodna brzina	m/s	6	5	4,5	3,5

Kod obodnih brzina većih od 6 m/s kritično mjesto zupčaste pumpe je usisna komora. Zbog visokih brzina rotacije zupčanika, kratkotrajnog procesa usisavanja i djelovanja centrifugalnih sila, prostor medjuzublja na usisnoj strani se ne popunjava sa uljem u cijelosti. Ovako nastali gubici se nazivaju kavitacijsko-volumetrijskim. Da bi se ovi gubici smanjili povećava se ugao usisne komore do 90°.

Do proticanja ulja iz komore visokog pritiska (potisna strana) u komoru niskog pritiska (usisna strana), dolazi zbog prisutnih zazora:

- na mjestu kontakta bočnih strana zupčanika sa kućištem,
- na mjestu kontakta čeonih površina zupčanika sa kućištem,
- na mjestu kontakta zuba pogonskog i pogonjenog zupčanika.

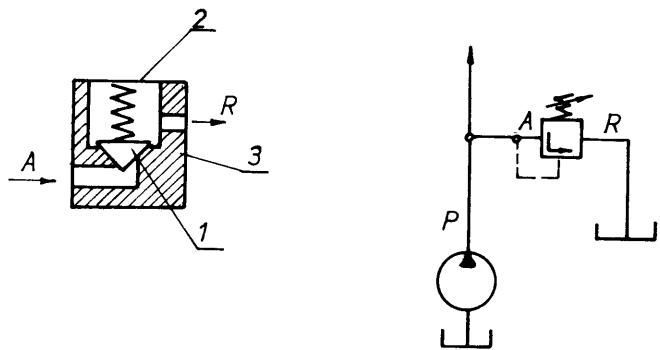
Isticanje kroz čone zazore predstavlja 75-80% ukupne količine ulja koja protiče u stranu niskog pritiska. Međutim, isticanje na mjestu kontakta može biti veće po intenzitetu u slučajevima neispravne montaže, kada dodje do neparalelnosti ose rotacije. Veličine dozvoljenih zazora su u ovisnosti od radnog pritiska. Čoni zazor se kreće u granicama 5-30 μm , a bočni 5 do 50 μm .

Elementi za kontrolu i regulaciju rada

Ventil za ograničenje pritiska u instalaciji sistema za centralno podmazivanje obavljaju funkciju sigurnosnog ventila. Često su izvedbe pumpi kod kojih je ovaj ventil ugradjen direktno u kućištu. Ventili za ograničenje pritiska se dijele na ventile direktnog i indirektnog dejstva. Obzirom na hidrauliku rada sistema za podmazivanje i njegove zahtjeve, po pravilu se ugradjuju ventili direktnog dejstva, bez obzira na kapacitet i veličinu radnog pritiska. Presjek ventila za ograničenje pritiska i njegova šema priključenja su prikazani na sl. 8.

Ventil za ograničenje pritiska se priključuje na cijevnu instalaciju pomoćnim vodom. Strana A ventila je spojena sa glavnim tlačnim vodom, a strana R je spojena sa rezervoarom. Pritisak ulja stalno djeluje na konusnu

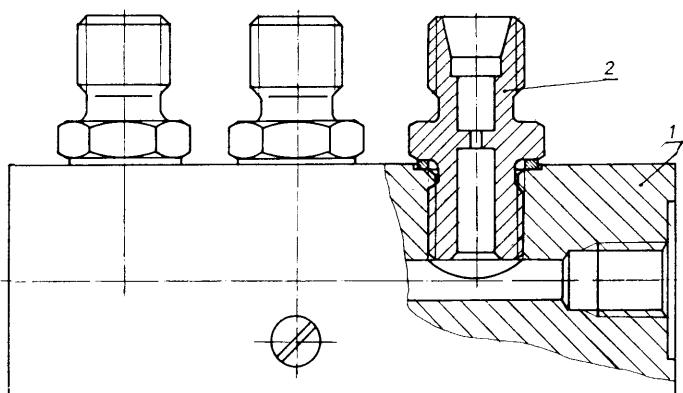
glavu ventila (1) stvarajući silu pritiska $F_p = p A$. Ovoj sili se suprotstavlja sila opruge (2), koja je u normalnim uslovima rada sistema veća od sile pritiska.



Sl. 8. - Presjek ventila za ograničenje pritiska direktnog dejstva

Kod porasta pritiska, raste i veličina sile pritiska i onog momenta kada postane veća od sile opruge, ventil se otvara i propušta u rezervoar određenu količinu ulja. Veličina pritiska, na kome će se ventil otvoriti se može mijenjati podešavanjem sile opruge (2).

Regulacija količine ulja koja se dovodi maznom mjestu, se vrši ugradnjom mlaznice odgovarajućeg prečnika ili podešavanjem veličine površine otvora kroz koji protiče ulje prema maznim mjestima. Kod ugradnje mlaznica neophodno je vršiti proračun protoka i pada pritiska, vodeći računa da protok kroz mlaznicu ovisi od njenog prečnika i pritiska ispred nje. Na sl. 9 je prikazan presjek blo-

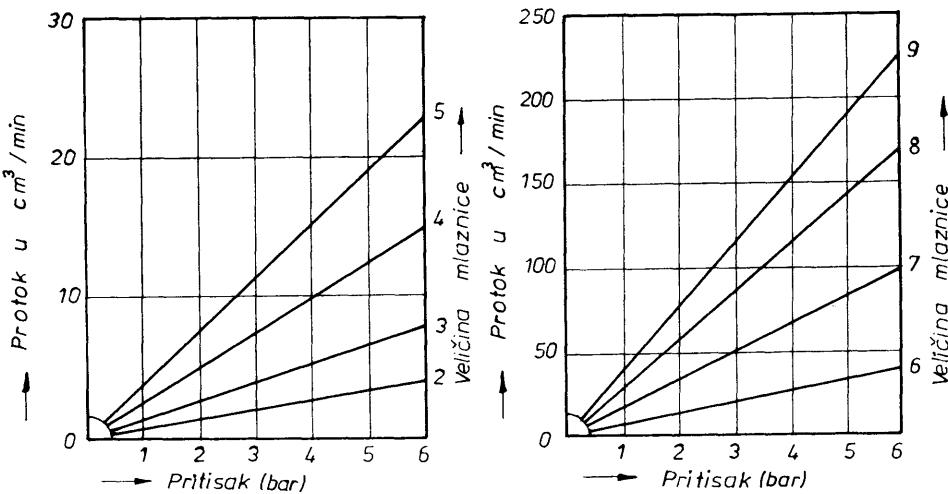


Sl. 9. - Presjek razvodnog bloka sa tri mlaznice

ka sa tri ugradjene mlaznice. Izbor mlaznica odgovarajućeg prečnika se vrši u odnosu na potreban protok i priti-

sak. Na sl. 10. su prikazane krive promjene protoka kroz mlaznice sa različitim veličinama prečnika.

pritisak, od strane pumpe ili onaj iza razvodnika. Protok, kroz razvodnik će se mijenjati i kod promjene temperature ulja, jer je posljedica promjene temperature promjena viskoziteta, čija veličina utiče na gubitke priti-



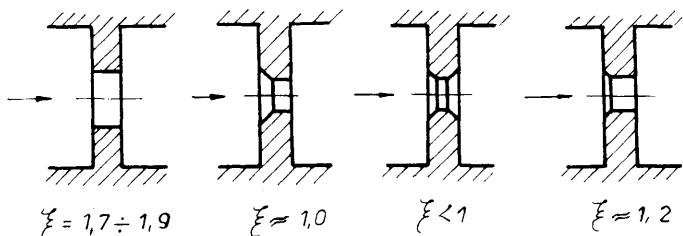
Sl. 10. - Krive promjene protoka kroz mlaznice različitog prečnika

Pad pritiska kroz mlaznicu se inače može proračunati prema poznatom obrascu za proračun lokalnih otpora:

$$\Delta p = \xi \frac{v^2}{2} \rho,$$

gdje je: ξ - koeficijent lokalnog otpora mlaznice,
 v - brzina strujanja kroz mlaznicu,
 ρ - specifična gustina ulja.

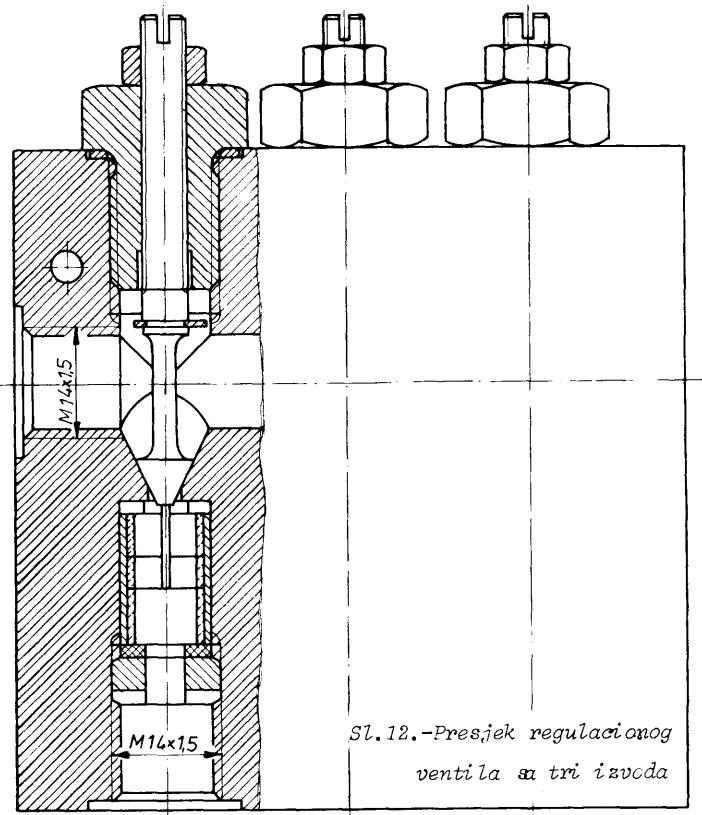
Veličina koeficijenta lokalnog otpora zavisi od oblika mlaznice. Na sl. 11. su prikazana četiri karakteristična oblika mlaznice sa naznačenim prosječnim vrijednostima koeficijenta lokalnog otpora.



Sl. 11. - Vrijednost koeficijenta lokalnog otpora kod raznih oblika mlaznice

Protok kroz regulacione ventile takođe ovisi od površine presjeka, kroz koji protiče ulje i od veličine pritiska ulja. To znači da će kod podešene veličine površine, dolaziti do promjene protoka ukoliko se bude menjao

ska u razvodnom ventilu. Ventili za regulaciju protoka, koji se koriste u sistemima za podmazivanje su ventili kod kojih na veličinu protoka utiču pritisak i temperatura. Iako postoje konstrukcije ventila na čiju funkciju ne utiču pritisak, temperatura ili oboje istovremeno, taki se u sisteme za podmazivanje veoma rijetko ugradjuju.



Sl. 12. - Presjek regulacionog ventila sa tri izvoda

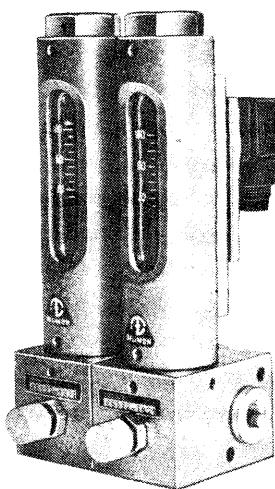
Na sl. 12. je prikazan presjek regulacionog ventila sa tri izvoda. Podešavanje protoka se vrši za svaki izvod posebno, podešavanjem veličine presjeka između konusnog dijela ventila i kućišta. Protok kroz ovakve ventile se kreće od 0 do 2 l/min.

Kontrola protoka ulja kroz glavni ili pomoćne vodove može se vršiti vizuelno, pregledom kontrolnika koji signaliziraju protok ili električnim putem, preko kontrolnika koji protok ulja pretvaraju u električni impuls. Električni kontrolnici se vežu u sistem elektronapajanja elektromotora postrojenja, tako da je uslov za rad postrojenja protok ulja kroz kontrolnik.

Vizuelni kontrolnici mogu biti različite konstrukcije: uljokazna stakla, zupčasti, sa kazaljkom i druge konstrukcije. Na sl. 13. je prikazana konstrukcija vizuelnog kontrolnika sa malim zupčastim motorom. Kada ulje protiče kroz njega zupčanici rotiraju. Namjenjen je za ugradnju u pomoćne vodove i protoke ulja do 35 cm³/min.



Sl. 13. - Vizuelni kontrolnik protoka



Sl. 14. - Ventil sa električnom i vizuelnom kontrolom protoka

Na sl. 14. je prikazan kombinovani ventil sa vizuelnom i električnom kontrolom protoka. Prikazan je ventil sa dva bloka, a mogu se po modularnom sistemu nizati do 8 blokova. Protok se podešava preko ugradjenog ventila, kroz otvor prema izlazu. Na staklenoj cjevčici su ucrtani podeoci 20, 60 i 100% od nominalnog protoka, a magnetski plavak se ovisno o veličini protoka penje od odgovarajućeg podioka. Istovremeno se daje i električni impuls da kroz ventil protiče ulje.

U red j a j i z a h l a d j e n j e

Na svim mjestima kontakta dvaju površina, koje se nalaze u procesu relativnog kretanja, zbog pojave sile trenja i procesa habanja, razvija se toplota. Ovisno o karakteristikama tribološkog sistema u toplotu se pretvara 5-50% uložene energije, te se na osnovu tih podataka može zaključiti, da količina razvijene toplote, naročito kod sistema velike snage predstavlja ozbiljan problem. Žadatak ulja u cirkulacionom sistemu podmazivanja je, da osim funkcije podmazivanja, obezbjedi i odvodjenje topline sa tijela na čijim se površinama ona stvara. U toplotu se pretvara i sva utrošena energija za savladavanje otpora tečenju u cjevovodu i elementima sistema za podmazivanje.

Ukupna količina topline koju apsorbuje sistem podmazivanja, pod kojim se u ovom slučaju podrazumjeva sklop sastavljen od svih dijelova sistema i ulja, se može izračunati prema formuli:

$$C = m_u c_u + m_m c_m \left(\frac{kWh}{K} \right)$$

gdje je: C - ukupan toplotni kapacitet sistema za podmazivanje,

m_u - masa ulja,

c_u - specifični toplotni kapacitet ulja
(kWh/kg °K)

m_m - masa elemenata sistema za podmazivanje,

c_m - specifični toplotni kapacitet elemenata sistema za podmazivanje.

Podaci o specifičnom toplotnom kapacitetu i specifičnoj gustini materijala koji se u ovim proračunima uzimaju u obzir su dati u tabeli 1.

TABELA 1.

Medij	Specifični toplotni kapacitet (kWh/kg °K)	Specifična gustina (kg/m ³)
Voda	$1,16 \cdot 10^{-3}$	1.000
Ulje	$0,523 \cdot 10^{-3}$	900
Vazduh	$0,279 \cdot 10^{-3}$	1,15
Čelik	$0,128 \cdot 10^{-3}$	7.860

U rezervoaru sistema za podmazivanje se stalno nalazi ulje čiji je volumen 5-25 puta veći od minutnog kapaciteta pumpe. Nakon obavljenih funkcija podmazivanja ulje se odvodi u rezervoar i ono sa sobom donosi toplotu koju je preuzele u mjestu za podmazivanje. U rezervoaru se mješa sa uljem koje se nalazi u rezervoaru i dolazi do izjednačavanja temperature. Temperatura ulja u rezervoaru postepeno raste, ona postaje viša nego je temperatura okoline i tada dolazi do razmjene toplote sa okolinom. Odredjeno vrijeme je dovedena količina topline veća od emitovane u okolini, ali će se one, bez obzira na količine topline koje se dovode i temperaturu okoline, izjednačiti. To znači da će se temperatura ulja održavati konstantnom. Visoka temperatura ulja nije poželjna u sistemu za podmazivanje, jer zagrijano ulje neće preuzimati potrebnu količinu topline u maznom mjestu, te ne može kvalitetno obavljati funkciju hladjenja. Osim toga, na višim temperaturama su procesi oksidacije ulja intenzivniji, te će se u njemu brže stvarati kiseline, koje agresivno djeluju na metalne površine. Poznata je zakonitost da ulje već na temperaturama preko 80°C stari veoma brzo, kod svakog daljnog porasta temperature za 10° stari dva puta brže. Na višim temperaturama dolazi do naglog pada viskoziteta, pa se ni funkcija podmazivanja ne obavlja dobro. Optimalne radne temperature se kreću u granicama $40-60^{\circ}\text{C}$. Da bi se eliminisali eventualni problemi neophodno je proračunati porast temperature ulja u rezervoaru i ukoliko se pokaže potrebnim uvesti prinudno hladjenje ulja.

Količina topline koja se emituje u okolinu se može proračunati prema obrascu:

$$Q_z = k A_r (t_1 - t_2)$$

gdje je: A_r - površina rezervoara (mm^2)

k - ukupni koeficijent prenosa topline ($\text{kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$)

t_1 - temperatura ulja,

t_2 - temperatura okoline.

Koeficijent prelaza topline se proračunava prema obrascu:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{s}{\lambda}} ,$$

gdje je: α_1 - koeficijent prelaza topline od ulja na zidove rezervoara ($\text{kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$),

α_2 - koeficijent prelaza topline od zidova rezervoara u vazduh ($\text{kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$)

s - debljina zida rezervoara,

λ - topotna vodljivost zida rezervoara.

Vrijednost α_1 se kreće između $1,74-4,64 \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$. Vri-

jednosti α_2 se mogu odrediti u odnosu na brzinu kretanja vazduha u okolini rezervoara, prema sljedećem:

- a) vazduh je potpuno nepokretan, $\alpha_2 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$,
- b) vazduh struji oko rezervoara, $\alpha_2 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$,
- c) vazduh se kreće brzinom 2 m/s , $\alpha_2 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$.

Topotna vodljivost zida rezervoara ovisi od materijala, ako je od čelika $\lambda = 52 \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$, a ukoliko je od aluminijuma $\lambda = 200 \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$.

Ukoliko se ne raspolaže sa svim potrebnim podacima, mogu se približno usvojiti sljedeće vrijednosti ukupnog koeficijenta prelaza topline:

- a) $k = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ - slaba cirkulacija vazduha oko rezervoara,
- b) $k = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ - normalna cirkulacija vazduha oko rezervoara,
- c) $k = 12-24 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ - intenzivna cirkulacija vazduha oko rezervoara.

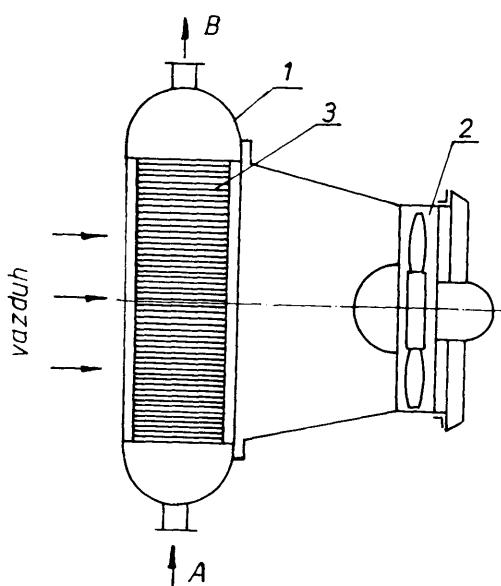
Kada zagrijavanje ulja nije veliko, preuzeta količina topline se preko površine rezervoara odaje u okolinu i tako ohladjeno ulje se opet transportuje do mjesta podmazivanja. Kada je zagrijavanje ulja intenzivno ili su temperature okoline povišene pa je zbog toga razmjena topline sa okolinom usporena, ulju se mora prinudno oduzeti akumulirana topotna energija.

To se može vršiti pomoću struje vazduha ili vode koji se dovode u uređaj za hladjenje. Ovi uređajevi se najčešće nazivaju hladnjaci.

Sistemi hladjenja sa vazduhom se relativno rijetko koriste zbog ograničenih mogućnosti oduzimanja topline. Naime, donja granica temperatura do koje se u idealnom slučaju, može ohladiti medij je određen temperaturom rashladnog medija. Temperatura vazduha i letnog perioda je relativno visoka, a upravo tada je neophodno odvesti najveću količinu topline. Ograničene mogućnosti hladjenja su limitirajući faktor upotrebe vazdušnih hladnjaka. Osim toga hladjenje vazduhom uslovljava lokaciju sistema izvan uljnih podruma, što je drugi ograničavajući faktor. Ali, sistemi za hladjenje vazduhom imaju veliku prednost u odnosu na druge, rashladni medij - vazduh je besplatan i ima ga u okolini u izobilju, te bi ih zbog toga bilo neophodno koristiti gdje je god to moguće. Na sl. 15. je prikazana konstrukcija hladnjaka ulja sa vazduhom, veoma slična izvedbi hladnjaka motora sa unutrašnjim sagorjevanjem.

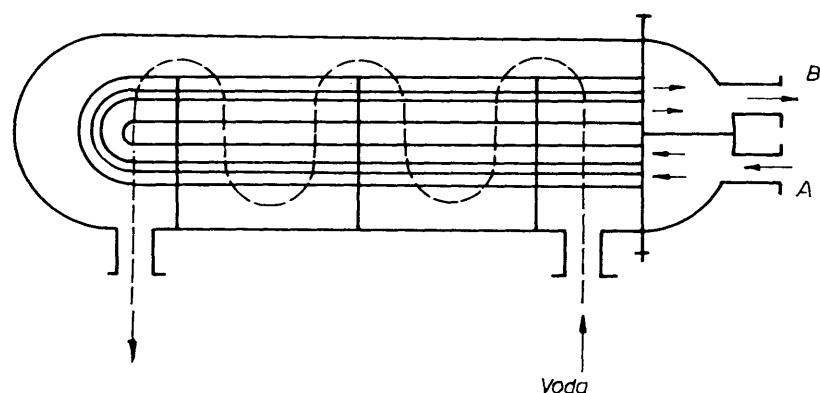
Zagrijano ulje dotiče u hladnjak na dovod A i prolazi kroz snop cijevi smještene u kućištu hladnjaka (1). Ohladjeno ulje izlazi na otvor B . Vazduh se prisilnim putem transportuje kroz kućište hladnjaka, preko venti-

latora (2). Zbog efikasnijeg odvodjenja topline u kućištu su postavljena rebra (3), kojima se povećava površina kontakta sa vazduhom.



Sl. 15. - Konstrukcija hladnjaka sa vazduhom

Na sl. 16. je prikazana šema cijevnog hladnjaka kod koga je rashladni medij voda. Ulje ulazi na otvor A, prolazi kroz cijevi, oko kojih struji voda i ohladjeno izlazi na otvor B.



Sl. 16. - Cijevni hladnjak sa vodom

Intenzitet odvodjenja topline u vodenom hladnjaku ovisi od razlike temperature vode i ulja i od površine hladnjaka. Ukupna količina topline koja se odvodi u jednom hladnjaku se može izračunati prema formuli:

$$Q = A_h q = A_h k \Delta T_s \text{ (kW)}$$

gdje je: A_h - površina hladnjaka (m^2)
 k - koeficijent prenosa topline ($\text{kW}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$)
 ΔT_s - razlika temperature ulja i vode.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{s}{\lambda}}$$

Član s/λ je za glatke i čiste cijevi veoma mali. Ali ukoliko su kontaktne površine razdvojene nečistoćom, kao što to može biti kamenac na površini hladnjaka, tada koeficijent prelaza topline k postaje manji. Kod vodenih hladnjaka se može smanjiti do 15%. Zbog toga se kod proračuna hladnjaka ovi elementi moraju obuhvatiti odnosan s/λ .

Na sl. 17. je prikazana kriva promjena temperature kod kontakta ulja - zid cijevi - voda.

Srednja temperaturna razlika ΔT_s se može izračunati prema formuli:

$$\Delta T_s = \Delta T_{su} - \Delta T_{sv}$$

gdje je: ΔT_{su} - srednja temperatura ulja,
 ΔT_{sv} - srednja temperatura vode.

Na sl. 18. je prikazan dijagram promjene temperature ulja i vode, kod hlađenja sa istim tokom tečenja (a) i suprotnim tokom tečenja (b), ulja i vode u hladnjaku.

Srednja temperatura ulja se proračunava po jednačini:

$$\Delta T_{su} = \frac{t_{ul} + t_{u2}}{2}$$

a srednja temperatura vode po jednačini:

$$\Delta T_{sv} = \frac{t_{v1} + t_{v2}}{2}$$

pa je:

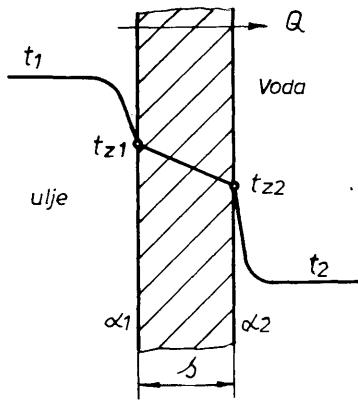
$$\Delta T_s = \frac{t_{ul} + t_{u2}}{2} - \frac{t_{v1} + t_{v2}}{2}$$

Da bi efekat hlađenja bio što bolji, treba se doveсти voda čija je temperatura najmanje za 25°C manja od temperature ulja.

Predana količina topline u hladnjaku se proračunava po formuli:

$$Q = c V \rho \Delta T \text{ (kW)}$$

gdje je: Q - odvedena količina toplotne energije (kWh),
 V - protok vode (m^3/h),
 c - specifični toplotni kapacitet vode (kWh/kg $^{\circ}K$),
 ΔT - razlike temperature, prije i poslije hladjenja.



Sl. 17. - Promjena temperature kod vodenog hladnjaka

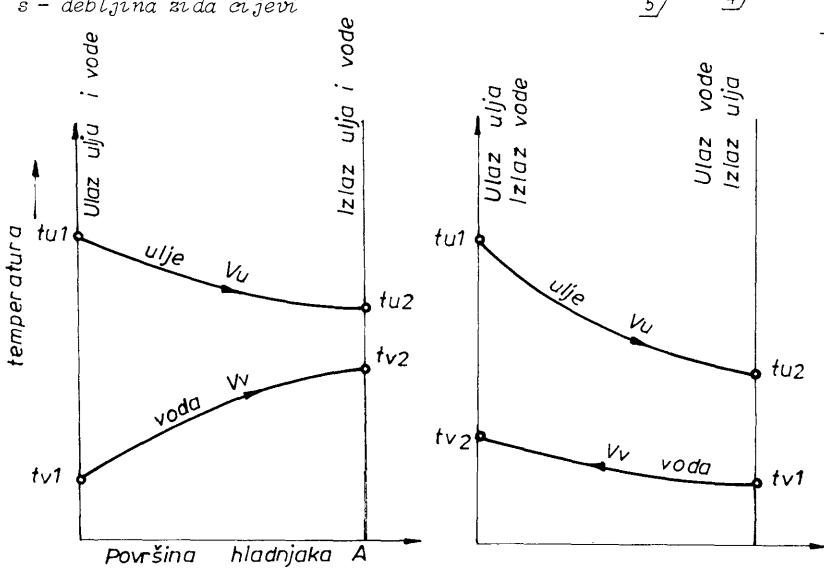
t_1, t_2 - temperature ulja i vode

t_{z1}, t_{z2} - temperature zida hladnjaka

α_1, α_2 - koeficijenti prelaza topline, ulje-metal, odnosno metal-voda

λ - toplotna vidljivost zida hladnjaka

s - debљina zida cijevi

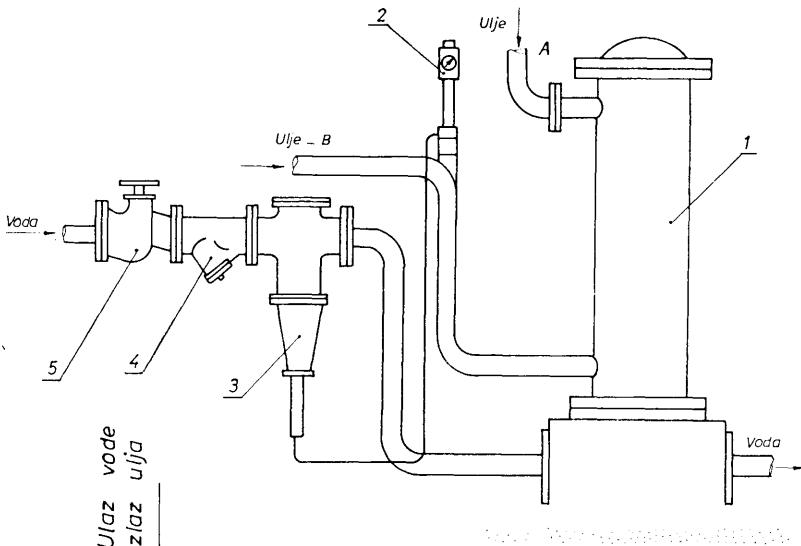


a) Isti tok tečenja ulja i vode b) Suprotni tokovi ulja i vode

Sl. 18. - Promjena temperature kod vode i ulja u hladnjaku

Eksperimentalnim putem je utvrđeno da se kod hladnjaka sa vodom vrši razmjena topline prema sljedećem: kod vodene ulazne temperature $15^{\circ}C$, a izlazne $60^{\circ}C$, svaki litar vode oduzme ulju oko $60 \cdot 10^{-3}$ kWh, što znači da se za svakih 0,736 kWh potroši oko 10 lit. vode na sat.

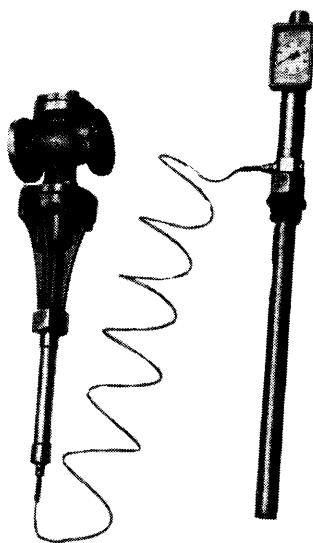
Kod sistema za podmazivanje sa intenzivnim zagrijavanjem ulja, i velikim protočnim količinama je rješenje sistema za hladjenje od izuzetnog značaja. Ne samo zbog sigurnog dovodjenja ulja na potrebnu radnu temperaturu, nego i zbog ekonomičnosti rada cijelog sistema. Navedeni podatak o potrošnji vode za hladjenje tako projektovati da se za hladjenje troši najmanja potrebna količina vode. To važi naročito u proizvodnim pogonima kod kojih nije rješeno pitanje snabdjevanja sa industrijskom vodom, pa se hladjenje ulja mora vršiti sa vodom za piće. Na sl. 19. je prikazan izgled sistema za hladjenje sa automatskom regulacijom protoka vode u odnosu na temperaturu ulja. Sistem se sastoji od vertikalnog cijevnog hladnjaka (1), u koji se na stranu A dovodi zagrijano ulje, a na stranu B se odvodi ohladjeno ulje. Na cjevovodu za odvod ohladjenog ulja (B), postavljen je termometar (2), koji je povezan sa ventilom (3). Na dijelu cijevne instalacije, kojom se dovodi voda za hladjenje postavljeni su ručni ventil (5), filter (4) za izdvajanje mehaničkih nečistoća i voda i ventil za automatsku regulaciju (3). U donjem dijelu ovog ventila postavljen je termoelement, koji prima impuls termometra (2) i podešava veličinu otvora kroz koji protiče voda u hladnjak.



Sl. 19. - Sistem za hladjenje sa automatskom regulacijom količine vode

Na sl. 20. je prikazan izgled termometra (2) i ventila (3).

$$\sigma = \text{specifični topotni kapacitet ulja } 0,523 \cdot 10^{-3} \text{ (kWh/m}^2 \text{ K)}.$$



Sl. 20. - Izgled ventila sa termometrom

Uredjaj za zagrevanje

U određenom broju slučajeva kada su razlike temperature okoline i radne temperature ulja velike, kada se radi o visokim zahtjevima mašine sa određenom vrednošću viskoziteta i nekim drugim slučajevima, ulje se prije puštanja sistema za podmazivanje u rad, mora zagrijati na radnu temperaturu. Grijaci ulja mogu biti električni i parni.

Parni grijaci su u principu izmjenjivači toplote, slični po konstrukciji hladnjacima, uz napomenu da se sada ulju predaje toplota. Cijevi za zagrijavanje se postavljaju u rezervoaru, jer je ulje u rezervoaru neophodno zagrijati. Kod izrade konstruktivnog rješenja mora se voditi računa da se nikada ne smije ostvariti kontakt između ulja i površina koje su zagrijane preko 80-90°C. Ukoliko se ovaj uslov ne zadovolji doći će do intenzivnog procesa oksidacije ulja.

Proračun kapaciteta grijaca ovisi od količine ulja u rezervoaru, temperature na koju ulje treba zagrijati i dužine vremena za koje se ulje treba zagrijati. Potrebna snaga grijaca se proračunava prema obrascu:

$$N = \frac{(t_2 - t_1) V c \rho}{t} \quad (\text{kW}),$$

gdje je: t_1 - temperatura ulja prije zagrijevanja (°K),
 t_2 - temperatura ulja nakon zagrijevanja (°K),
 V - volumen ulja i rezervoara (m^3),
 t - potrebno vrijeme zagrijevanja (h),

Na brzinu zagrijavanja utiče razlika temperature površine zagrijivača i ulja. Navedeni obrazac važi za proračun mirnog ulja, ali ukoliko se želi skratiti vrijeme zagrijavanja neophodno je ulje pokrenuti iz stanja mirovanja. To se može postići uključenjem u rad pumpe sistema za podmazivanje. U slučaju da je za vrijeme zagrijavanja ulje nepokretno specifično topotno opterećenje površine patrona (kod zagrijavanja parom ili električnom energijom) se može kretati do vrijednosti $0,5 \text{ W/cm}^2$, a ukoliko se obezbjedi kretanje ulja isto se može povećati i do vrijednosti 2 W/cm^2 .

LITERATURA

- [1] KLAUS E. LANG: Zentralschmieranlage
- [2] Д. Н. ГАРКУНОВ: Автоматизированые смазочные системы и устройства, Москва 1982.
- [3] V. SAVIĆ: Tribologija, 1979, Mašinski fakultet u Zenici
- [4] M. BAŠTA: Mašinska hidraulika, Naučna knjiga, Beograd, 1973.
- [5] H. EBERTSHÄUSER: Bauelemente der Olhydraulik, Krauskopf, 1973.
- [6] J. IHRING: Projektovanie hydraulickych a pneumatickych obvodov, Lenjingrad, 1983.
- [7] G. BEITTER: O+P Konstruktion
- [8] P. JOVANOVIĆ: Održavanje uljne hidraulike, OMO-Beograd, 1984.
- [9] Mobil: Olhydraulische Anlagen, Mobil Oil-Wien, 1979.
- [10] Kataloški i stručni objavljeni materijali firmi:
 - RO PREMIZ, COUR REP - Zenica
 - Alex - Friedmann - Wien
 - Mann - Filter - Ludvigaburg
 - Pall - GmbH - Spandlingen

