

LIETUVOS ŽEMĖS ŪKIO UNIVERSITETAS

Žemės ūkio inžinerijos fakultetas

Mašinų gamybos ir serviso katedra

Raimundas Rukuiža

METALOPOLIMERINIŲ MEDŽIAGŲ ĮTAKA ŽEMĖS ŪKIO TECHNIKOS TRINTIES PORŲ PATIKIMUMUI

Daktaro disertacijos santrauka

Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T) -
žemės ūkio inžinerija, žemės ūkio technika

Kaunas-Akademija, 1998

Darbas atliktas 1994 - 1998 metais Lietuvos žemės ūkio universitete.
Doktorantūros teisė suteikta 1992 10 07 LRV nutarimu Nr.739.

Doktorantūros komitetas:

pirmininkas ir darbo vadovas:

doc., dr. Juozas Padgurskas (Lietuvos žemės ūkio universitetas, technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija, žemės ūkio inžinerija, žemės ūkio technika);

nariai:

prof., habil. dr. Ramutis Bansevicius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija, mechaninė inžinerija, hidraulika, vakuuminė technologija, virpesių ir
akustikos inžinerija);

prof., habil. dr. Povilas Algimantas Sirvydas (Lietuvos žemės ūkio universitetas, technologijos
mokslai, mechanikos inžinerija, žemės ūkio inžinerija, žemės ūkio technika);

prof., habil. dr. Jonas Sirvydis (Lietuvos žemės ūkio inžinerijos institutas, technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija, žemės ūkio inžinerija, žemės ūkio technika);

doc. dr. Vytautas Serapinas (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos
inžinerija, gamybos technologija).

Oponentai:

prof. habil. dr. Renius Žeromskas (Vilniaus technikos universitetas, technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija, mechaninė inžinerija, hidraulika, vakuuminė technologija, virpesių ir
akustikos inžinerija);

doc. dr. Juozas Pyrantas (Lietuvos žemės ūkio universitetas, technologijos mokslai, mechanikos
inžinerija, žemės ūkio inžinerija, žemės ūkio technika).

Disertacija buvo ginama viešame doktorantūros komiteto posėdyje, kuris įvyko 1998 m. gegužės 14 d.
11 val. Lietuvos žemės ūkio universitete, Ž.ū. inžinerijos fakultete, 212 auditorijoje. Adresas: LŽŪU
Noreikiškės, 4324 Kauno raj., Lietuva. Telefonas: 27 296398, faksas: 27 296531 (+370 7 296531).

Su disertacija galima susipažinti LŽŪU bibliotekoje.

TURINYS

Įvadas	3
1. Literatūros apžvalga	3
1.1. Trinties ir dilimo rūšys, reikšmingos žemės ūkio mašinų ir vidaus degimo variklių darbui	
1.2. Precizinių porų darbo sąlygos	
1.3. Radialinių sandarinimo žiedų darbo sąlygų tyrimai	
1.4. Žemės ūkio technikos tribotechninių uždavinių sprendimo būdai	
1.5. Tribotechninių medžiagų rūšys ir jų panaudojimo sritys	
2. Trinties momentas hidrodinaminio ir elastohidrodinaminio tepimo modeliuose	5
2.1. Trinties porų tepimo sąlygos	
2.2. Trinties momentas, esant hidrodinaminiam tepimui	
2.3. Trinties momentas, esant elastohidrodinaminiam tepimui	
2.4. Sandarinimo trinties porų paviršių sąveikos ir tepimo modeliai, naudojant specialias metalopolimerines medžiagas	
3. Tyrimų objektas ir metodika	8
3.1. Tirtų tribotechninių medžiagų savybės ir panaudojimo metodika	
3.2. Precizinių porų tyrimų objektas ir metodika	
3.3. Sandarinimo porų tyrimo objektas ir metodika	
4. Tyrimų rezultatai ir jų apibendrinimas	10
4.1. Precizinių porų tyrimo rezultatai	
4.2. Sandarinimo porų tyrimo rezultatai	
4.3. Trinties momento skaičiavimo modelio sukūrimas ir trinties sąlygų įvertinimas	
4.4. Tribotechninių medžiagų struktūros ir procesų trinties kontakto zonoje analizė	
5. Išvados	13
Publikacijų disertacijos tema sąrašas	14

IVADAS

Problemos aktualumas.

Daugumos mašinų (85 - 90 %) gedimo priežastis - detalių nudilimas. Daugiau kaip pusė degalų ir tepalų, suvartojamų automobiliuose ir traktoriuose, naudojamuose žemės ūkyje, yra skirta judamų sujungimų trinčiai nugalėti. Todėl svarbu, kad šios mašinos patikimai dirbtų, t.y. reikėtų prailginti ypač dažnai gendančių detalių naudojimo laiką. Taip pat aktualu laiku diagnozuoti variklio detalių susidėvimą ir jas atnaujinti. Tam galima būtų panaudoti įvairias tribotechnines medžiagas.

Sunkios mašinų, kuriomis dirbama žemės ūkyje, darbo sąlygos ypač atsiliepa didesnio tikslumo trinties poroms, turinčioms kontakto su agresyvia aplinka, pasižyminčia gausiu abrazyvinių dalelių kiekiu. Prie tokių porų pirmiausia priskiriamos sandarinimo poros, skiriančios vidines variklių ar hidraulinių sistemų tepalo apytakos sistemas nuo aplinkos. Labiausiai jas veikia gausūs dulkių kiekiai, esantis ore, taip pat per dirvožemio dalelės, patenkančios ant žemės ūkio mašinų hidraulinių sistemų ir savaeigių mašinų variklių. Dažniausiai naudojamas sandariklių tipas - radialiniai sandarinimo žiedai (RSŽ). Dulkės, patenkančios į degalus, ne tik suprastina degalų kokybę, bet ir labai sutrumpina degalų aparatūros ilgaamžiškumą. Pagrindinė degalų siurblio gedimų priežastis - precizinių porų, o ypač plunžerinių porų susidėvimas ir užstrigimas.

Tiek RSŽ, tiek plunžerinės poros priklauso prie padidinto tikslumo trinties porų. Todėl parenkant joms tribotechnines medžiagas ypač svarbu nustatyti šių porų trinties ir tepimo sąlygas bei dilimo mechanizmą. Nuo to priklausys tiek tolesni šių porų patikimumo didinimo metodai, tiek galimybė šioms poroms pritaikytas ir išbandytas tribotechnines medžiagas naudoti kitų žemės ūkyje naudojamų mašinų trinties sujungimams, kurių tikslumo ir priežiūros reikalavimai ne tokie dideli.

Darbo tikslas: Ištirti metalopolimerinių tribotechninių medžiagų įtaką kai kurių žemės ūkio technikoje naudojamų trinties porų tribologiniam patikimumui.

Mokslinis naujumas. Ištirta metalopolimerinių medžiagų įtaka žemės ūkio technikos padidinto tikslumo ir sandarinimo trinties porų patikimumui. Šios tribotechninės medžiagos panaudotos nagrinėjamos trinties poroms pirmą kartą. Sudarytas šių medžiagų trinties mechanizmo sandarinimo porose modelis.

Išvestos formulės ir sudarytos lentelės sandarinimo trinties poros trinties momentui apskaičiuoti, panaudojant įvairaus tipo tribotechnines medžiagas. Lyginant su teoriniais modeliais šios poros trinties procesus pasiūlyta aiškinti pagal hidrodinaminio arba elastohidrodinaminio tepimo teorijas.

Praktinė reikšmė:

- naudojant naujas tribotechnines medžiagas sumažinti precizinių ir sandarinimo trinties porų trinties nuostoliai ir padidintas jų ilgaamžiškumas;
- palygintas atsparumas dilimui precizinėse ir sandarinimo trinties porose, naudojant įvairius tribotechninių medžiagų variantus;
- sudaryti trinties nuostolių sandarinimo porose skaičiavimo modeliai, naudojant įvairius metalopolimerinių medžiagų variantus.

Publikacijos: Tribologinių medžiagų naudojimo, precizinių ir sandarinimo trinties porų patikimumo didinimo srityje autorius paskelbė 13 mokslinių straipsnių.

Autorius gina:

- ◇ metalopolimerinių tribotechninių medžiagų panaudojimo precizinėse ir sandarinimo trinties porose metodiką;
- ◇ precizinių ir sandarinimo trinties porų patikimumo tyrimo rezultatus;
- ◇ įvairių tribotechninių medžiagų variantų trinties momento sandarinimo trinties porose apskaičiavimo metodiką;
- ◇ trinties ir tepimo sąlygų modelį sandarinimo porose, panaudojant metalopolimerines dangas ir alyvos priedus;
- ◇ precizinių ir sandarinimo trinties porų trinties paviršių dilimo tyrimo rezultatus.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Trinties ir dilimo rūšys, reikšmingos žemės ūkio mašinų ir vidaus degimo variklių darbui

Žemės ūkio mašinose yra labai įvairių trinties porų, kurių trinties ir tepimo sąlygos bei dilimo mechanizmas gali turėti įvairių tribologinių modelių požymių (1.1 lent.). Akivaizdu, kad esant įvairioms tepimo sąlygoms skiriasi trinties porų ilgaamžiškumas, kuris priklauso nuo linijinio dilimo intensyvumo I_n ir kritinio atlaikomo trinties paviršių pakartotinio kontaktavimo skaičiaus n_k .

1.1 lent. Mašinų detalių trinties porų pavyzdžiai pagal trinties kontakto tepimo rūšį

Trinties kontakto rūšis	Kritinis paviršių kontaktavimo skaičius n_k	Linijinis dilimo intensyvumas I_n	Detalių trinties porų pavyzdžiai
Sausoji trintis	$10^4 \dots 1$	$10^{-3} \dots 10^{-8}$	Diržinės pavaros, presuoti ir srieginiai sujungimai, stabdžių ir sankabos diskai
Mišrioji trintis	$10^5 \dots 10^2$	$10^{-5} \dots 10^{-10}$	Variklio stūmokliai cilindre, degalų siurblių plunžeriai
Hidrodinaminis tepimas	$10^9 \dots 10^7$	$10^{-13} \dots 10^{-14}$	Slydimo, ašiniai, hidrostatiniai guoliai
Elastohidrodinaminė trintis	$10^8 \dots 10^5$	$10^{-7} \dots 10^{-13}$	Riedėjimo guoliai, krumpliaraičiai, grandininė pavarą, sandarinimo žiedas

1.2. Precizinių porų darbo sąlygos

Nagrinėjant plunžerinių porų dilimą yra svarbu žinoti plunžerinės poros darbo sąlygas ir medžiagas (1.2 lent.).

1.2 lent. Degalų siurblių plunžerinių porų darbo sąlygų, kai $n = 1000 \text{ r/min}$, charakteristika

Plunžerio darbo charakteristika	Siurblio tipas			
	UTN-5	ND 21/4	6TN-9x10	NK
Plunžerio judėjimo greitis, m/s	0...2.03	0...2.18	0...1.85	0 ... 2.5
Judėjimo kelias, mm	8	8		10 ... 12
Maksimalus išvystomas slėgis, MPa	39	38	35	80
Aplinkos temperatūra	50 ... 80 °C			

Plunžerinės poros detalės gaminamos iš kietų, dilimui atsparių plienų. Plunžerio ir plunžerinės įvorės cilindrinės dalies paviršiaus šiurkštumo parametras $Ra = 0,04 \text{ mm}$, jų kietumas svyruoja nuo 58 iki 61 HRC.

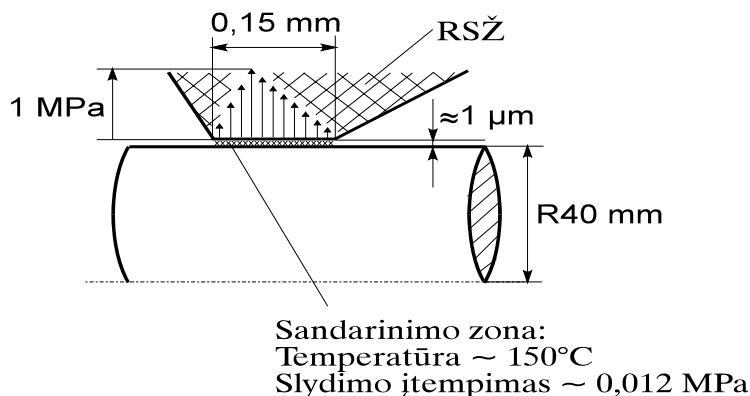
Plunžerinių porų susidėvimą sąlygoja trintis ir korozija. Dirbant plunžerinei porai, vienoje jos vietose, veikiant skysčio srautui, vyksta hidroerozinis, o kitose, paviršiams trinantis, - abrazyvinis dilimas. Dėl hidroerozinio ir abrazyvinio nudilimo išbrokuojama ~ 84% visų susidėvėjusių porų.

Taigi, degalų siurblių precizinės poros plunžeris-plunžerinė įvorė nudilimui, kartu ir sandarumo resursui, daugiausiai įtakos turi plunžerinės poros dilimas jos viršutinėje dalyje, kur pirmiausiai patenka abrazyvinės dalelės.

1.3. Radialinių sandarinimo žiedų darbo sąlygų tyrimai

Radialinis sandarinimo žiedas darbo metu turi garantuoti mašinos bloko sandarumą (darbo metu tarp veleno ir RSŽ neturi vykti nutekėjimas). Tribotechninėmis priemonėmis galime sumažinti trinties poros RSŽ-velenas energijos nuostolius ir padidinti ilgaamžiškumą.

Kai kurie darbo sąlygų trinties poroje duomenys buvo nustatyti modeliuojant RSŽ darbą. Slėgio pasiskirstymas sandarinimo zonoje nėra išmatuotas ir paprastai naudojamosi H.J.van Leeuwen'o ir M.J.L.Stakenborg'o modeliu. Dėl skirtingo nuožulnumo kampo RSŽ vidinėje ir išorinėje pusėje slėgis kontakto zonoje pasiskirstęs netolygiai - jo maksimumas pasislinkęs į vidinę kontakto pusę. Temperatūrą kontakto zonoje matavo V.Wollesen'as. Pagrindiniai darbo sąlygų duomenys pavaizduoti 1.1 pav.



1.1 pav. Radialinio sandarinimo žiedo kontaktas ir darbo sąlygos

Tepimo plėvelė pagal M.J.L.Stakenborg'ą susidaro sąlygomis, kurios yra panašios į polimero ir metalo elastohidrodinaminę trintį. V.Wollesen'o išvada, kad tribologinių sąlygų RSŽ negalima paaiškinti vien tik hidrodinamine tepimo teorija, pagal kurią trinties jėga yra sąlygojama tik alyvos vidinės trinties. Trinties momentui įtakos šiuo atveju galėjo turėti ir tiesioginis veleno ir elastomero kontaktavimas. Vadinas, teoriškai nustatytas polimero ir metalo trinties sąlygas galima pritaikyti RSŽ, laikant, kad sandarinimo kontakto darbas vyksta elastohidrodinaminio tepimo sąlygomis.

F.Schnürle, nagrinėdamas RSŽ darbo sąlygas ir nudilimą, padarė išvadą, kad RSŽ resursas, kurį suprantame kaip laikotarpį, kurio metu jis išpildo savo funkcijas, t.y. užtikrina mašinos korpuso sandarumą, priklauso nuo trinties poros tepimo sąlygų. Didžiausias ilgaamžiškumas pasiekiamas, kai pora dirba hidrodinaminio tepimo sąlygomis, netoli nuo ribos, nuo kurios pereinama į mišrų tepimą.

1.4. Žemės ūkio technikos tribotechninių uždavinių sprendimo būdai

Sprendžiant tiek žemės ūkio mašinų, tiek ir bet kurių kitų mašinų tribotechninius uždavinius reikia atsižvelgti į visus keturis pagrindinius tribologinės sistemos elementus (pagrindinis kūnas, kontrkūnas, tepamoji terpė ir aplinka), taip pat šiai sistemai įtaką darančius veiksnius.

Žemės ūkyje dirbančių mašinų trinties porų tribologinių sistemų specifika susijusi su didesne išorinio veiksnio - aplinkos įtaka. Tokia aplinka laikoma agresyvesnė nei kitų ūkio šakų dėl ore esančio didelio dulkių kiekio ir dažniau į

trinties poras supančią aplinką patenkančių dirvožemio abrazyvinių dalelių. Todėl abrazyvinio dilimo reikšmė žemės ūkyje dirbančių mašinų trinties poroms yra didelė.

Sprendžiant panašias tribologines problemas dažniausiai taikomas klasikinis trinties porų paviršių kietinimo būdas. Tokią klasikinę tribotechnikos kryptį D.Garkunov'as vadina komunaline. Gyvojoje gamtoje galime rasti natūraliosios tribotechnikos pavyzdžių, kai trinties paviršiai (pavyzdžiui, kaulų sąnariai) nėra kieti. Šiuo atveju tarp dviejų judančių trinties poros dalių nėra tiesioginio kontakto, o kontaktuoja per minkštas polimerines plėveles. Taip veikia ir trinties poros, kuriose sukuriama išrankinio pernešimo efektas (IPE).

Jeigu viena iš trinties poros pusių dėl savo funkcinių ypatybių turi būti minkšta (pavyzdžiui: elastomerinis RSŽ), tai didinant kontrkūno (veleno) kietumą pagal klasikinę tribotechniką būtina suintensyvěja minkštosios pusės (RSŽ) dilimas ir kartu sumažėja trinties poros ilgaamžiškumas. Taigi, sprendžiant panašias problemas, geriausia išeitis būtų panaudoti natūraliosios tribotechnikos principus.

1.5. Tribotechninių medžiagų rūšys ir jų panaudojimo sritys

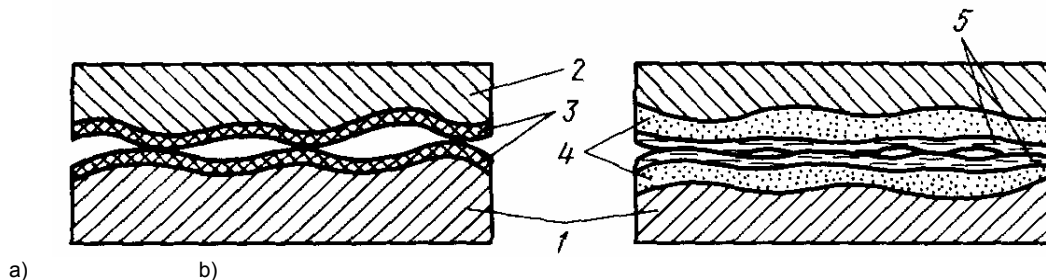
Tribologinio patikimumo didinimo priemonės, kurių panaudojimas buvo tiriamas šiame darbe, yra *tribotechninės dangos ir tepimo medžiagos*.

Tribotechninių dangų padengimo technologijas galima skirstyti į mechanines (užtepimas), termines (aplydymas, lazerinis apvirinimas, užpurškimas, PVD - fizinė garų disociacija ir kt.), elektrotermines (elektrolankinis, elektrokibirkštinis, plazminis apvirinimas ir kt.) ir elektrochemines (CVD - cheminė garų disociacija, elektrolitinė disociacija - plienavimas, chromavimas ir kt.).

Yra sukurtos specialios polimerinės medžiagos, panaudojant tokias jų teigiamas savybes kaip polimerų atsparumas korozijai ir mažesnis trinties koeficientas. Tokia medžiaga yra politetrafluoretilenas (PTFE) arba FOLEOX. Trinties su plienu metu nuo šio polimero atsiskiria medžiagos dalis, sudaranti plėvelę, kurios viduje grandinė orientuota išilgai trinties kryptiai.

Sprendžiant tribotechninius uždavinius **tepimo medžiagos** (alyvos, plastiniai tepalai, kietos tepimo medžiagos) chemiškai modifikuojamos tik tuo atveju, jei tai suderinama su ekonominėmis ir eksploatacinėmis sąlygomis. Kur kas dažniau tepimo medžiagos tribotechniškai modifikuojamos panaudojant specialius alyvos priedus. Priedai, sukuriantys vadinamąjį išrankinio pernešimo efektą, gali būti panaudojami tiek alyvose, tiek plastiniuose tepaluose.

Jo esmę sudaro savaiminio susiorganizavimo procesai, galintys vykti trinties poroje tam tikromis sąlygomis, dalyvaujant metaloorganinių junginių dalelėms. Veikiant paviršiuje aktyvioms molekulėms, esančioms metaloorganinėse kompozicijose, trinties paviršių kontaktų zonoje susiformuoja 1...2 mm storio servovitinė plėvelė iš minkšto metalo (vario, alavo) organinių junginių. Paviršiams kontaktuojant ši plėvelė (1.2 pav.) perima apkrovas ir įtempimus ir dėl susiorganizavimo proceso pastoviai atsinaujina.



1.2 pav. Detalių kontakto schema esant ribiniam tepimui (a) ir IPE (b), panaudojant alyvą su specialiais priedais: 1 - plienas; 2 - bronzas; 3 - oksidinės plėvelės; 4 - servovitinės plėvelės; 5 - polimerinės plėvelės

2. TRINTIES MOMENTAS HIDRODINAMINIO IR ELASTOHIDRODINAMINIO TEPIMO MODELIOSE

Nagrinėjant trinties sąlygas trinties porose pirmiausia reikia nustatyti, kokį joms reikia taikyti trinties ir tepimo modelį.

2.1. Trinties porų tepimo sąlygos

Skirtumus tarp įvairių tepimo sąlygų atspindi tepimo slukšnio storis ir pobūdis.

Esant *ribiniam tepimui* paviršių trintis ir dilimas priklauso nuo paviršių savybių ir tepimo medžiagos aktyvumo trinties paviršiuose. Tepimo skysčio klampis čia beveik neturi jokios įtakos. Susidaranti tepimo plėvelės storis yra mažas, lyginant su paviršių šiurkštumu.

Esant *skystajam tepimui*, kuriam priklauso taip pat ir hidrodinaminis tepimas, tepimo plėvelės sluoksnis daug kartų viršija trinties ribinės plėvelės storį ir suminį abiejų paviršių šiurkštumą. Paviršiai tiesiogiai nekontaktuoja, o skysčio slėgis šiame tepimo slukšnyje susidaro dėl paviršių judėjimo arba išorinio poveikio.

Elastohidrodinaminis tepimas. Esant didelėms apkrovoms ir paviršių tamprims deformacijoms kontakte susidaro elastohidrodinaminė plėvelė, o skysčio klampis kontakto zonoje padidėja.

Mišriajam tepimui priskiriamos ir ribinio, ir skystojo, ir elasto hidrodinaminio tepimo sąlygos. Į šias įvairias tepimo sąlygas tenka atsižvelgti nagrinėjant daugelio mašinų detalių darbą. Dėl paviršių nelygumų daug kur gali susidaryti mikropleištai, keičiantys tepimo plėvelės savybes, o tokių trinties porų mišrųjų tepimą reikia analizuoti atsižvelgiant į fizines ir chemines skysčio bei trinties paviršių savybes.

Kokybiškai įvertinti trinties porų tepimo sąlygas geriausiai galima pagal trinties koeficientą, o besisukančių trinties porų - pagal išvestinį dydį - trinties momentą.

2.2. Trinties momentas, esant hidrodinaminiam tepimui

Trinties momentas slydimo trinties poroms pagal klasikinį hidrodinaminio tepimo modelį apskaičiuojamas taip:

$$M = 2x \cdot h \cdot U \cdot R^2 \cdot b / h_{\min} \quad (2.1)$$

čia M - trinties momentas, N·m; x - sukimosi pasipriešinimo proporcingumo koeficientas; h - dinaminis alyvos klampis, Pa·s; U - greitis, m/s; R - veleno spindulys, m; b - kontakto plotis, m; h_{\min} - minimalus alyvos plėvelės storis, m.

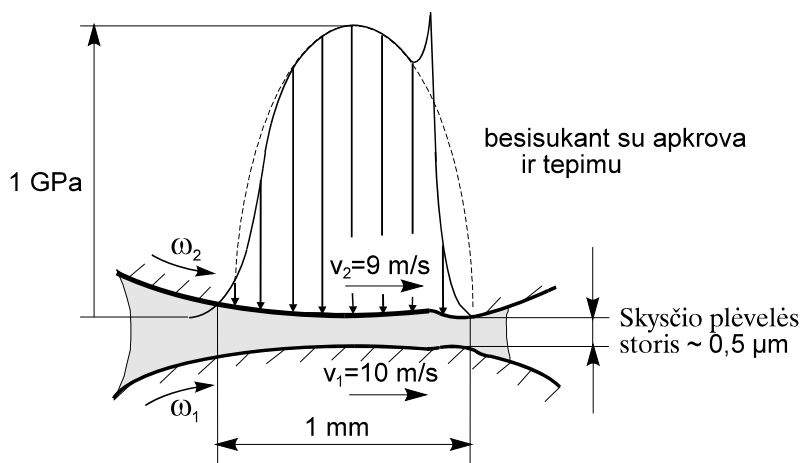
Nors R.Salant [49], H.J.van Leeuwen ir M.J.L.Stakenborg [28], V.Wollesen [59], S.J.R.de Oliveira [33] bei kiti mokslininkai, tyrinėjantys trinties sąlygas radialinio sandarinimo žiedo ir veleno kontakto zonoje, mano, kad šios poros tepimo sąlygas tiksliau atitinka ne hidrodinaminio, bet elastohidrodinaminio tepimo sąlygos. Tačiau, kurdami šios trinties poros darbo modelį ir nustatydami trinties poros parametrus, naudojo priklausomybę tarp trinties momento ir darbo sąlygų parametrų, panašią į hidrodinaminio tepimo trinties sąlygas.

Šią priklausomybę galima supaprastinti, pritaikant ją tam tikro tipo ir duomenų trinties poroms, kurioms konkretizuotusi dydžiai R , b , s ar h_{\min} .

2.3. Trinties momentas, esant elastohidrodinaminiam tepimui

O.R.Lang, E.-G.Paland ir F.Hock EHD kontaktą apibūdina per sekančius reiškinius: hidrodinamiškai tepamus Herzo kontaktus; alyvos plėvelės lygio elastines deformacijas; dideles energijos koncentracijas.

EHD kontakto vietoje slėgis yra rodikliu 10 didesnis negu slydimo guoliuose. Tepimo plėvelės storis būna mažesnis negu 1 mm, t.y. plėvelės storis yra tarp paviršiaus šiurkštumo amplitudžių (2.1 pav.).



2.1 pav. Elastohidrodinaminės trinties kontakto sąlygos

D.M.Bailey ir R.S.Sayles modeliavo įtempimų pasiskirstymą elastohidrodinaminiam paviršių kontakte. Jie nustatė, kad didžiausi medžiagos įtempimai realaus šiurkštumo paviršių Herzo kontakte koncentruojasi medžiagų paviršiuje arba labai arti jo. Buvo padaryta išvada, kad įtempimų pasiskirstymas ir paviršių šiurkštumo dydis lemia nuovargio įtrūkimų trinties poros paviršiuose formavimosi eigą.

Prie elastohidrodinaminės trinties sąlygų O.R.Lang priskiria radialinio sandarinimo žiedo kontaktą.

Klasikinį EHD trinties porų kontaktą apibūdina šie parametrai: alyvos plėvelės storis, apkrova, greitis bei medžiagos savybės. Priklausomybė tarp šių parametrų nustatoma pagal tokią formulę:

$$M = (b \cdot h_{\min} \cdot E' \cdot R^2) / (h \cdot a \cdot U) \quad (2.3)$$

čia E' - ekvivalentinis išilginio tamprumo koeficientas, Pa; a - klampio pjezo-koeficientas, Pa⁻¹.

Konkretizuojant dydžius E' , R , b ir h šią formulę galima pritaikyti ir trinties porai RSŽ-velenas.

2.4. Sandarinimo trinties porų paviršių sąveikos ir tepimo modeliai, naudojant specialias metalopolimerines medžiagas

Norint žinoti, kokia yra polimerinių ir metaloorganinių kompozicijų įtaka trinties sąlygų pokyčiams trinties porose, dirbančiose EHD trinties sąlygomis, reikia nustatyti trinties paviršių kontakto pobūdžio pokytį, panaudojus polimerines dangas arba IPE efektą sukuriančius alyvos priedus.

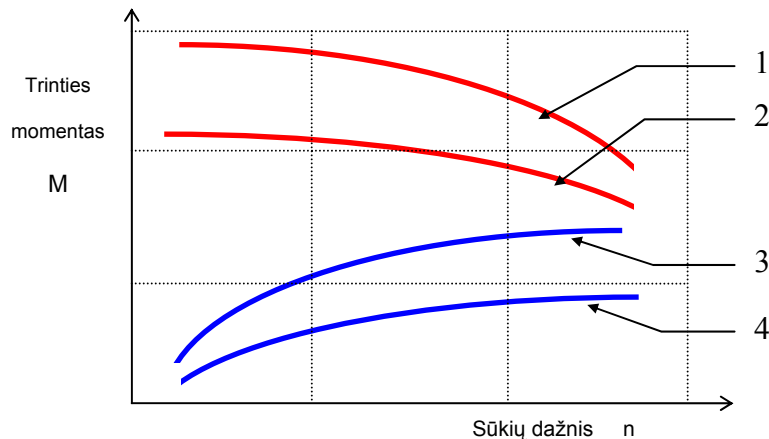
RSŽ-veleno trinties poroje kontaktuoja metalo (velenas) ir elastomero (RSŽ) paviršiai alyvos tepamojoje terpėje. Šiuo atveju dėl RSŽ tamprumo sudarytos radialinės jėgos kontakte susidaro labai maža tepimo plėvelė, o paviršių nelygumai kontaktuoja tiesiogiai. Todėl, nors metalas yra daug kietesnis, vykstant trinčiai dėl adhezinių jėgų ir abrazyvų poveikio paviršių šurkštumai sumažėja ir nudyla ne tik elastomero, bet ir metalo paviršius. Tačiau bet kuriuo atveju dėl daugkartinių paviršių Herzo kontaktų, elastinių savybių skirtumų bei didelių energijos koncentracijų kontakto zonose, šį kontaktą galima išreikšti elastohidrodinaminėmis tepimo sąlygomis.

Padengus veleną polimerine danga, pasižyminčia antiadhezinėmis ir paviršių sustiprinimo savybėmis (tokias savybes turi danga FOLEOX), turėtų keistis trinties paviršių struktūra, bet tepimo sąlygos turėtų išlikti tos pačios.

Taikant EHD sąlygų formulę, turėtų reikštis šio RSŽ-veleno kontakto specifinė ypatybė - tai, kad vienas iš kontaktuojančių paviršių yra elastomeras, kurio tamprumas mažėja, didėjant temperatūrai. Todėl tamprumo veiksnys E' , esantis formulėje (2.3) mažina šių trinties porų trinties momentą didėjant greičiams ir atitinkamai didėjant temperatūrai.

Veleną padengus metalopolimerine danga, kurios šiluminis laidumas yra prastesnis, esant didesniems greičiams, turėtų dar labiau padidėti alyvos temperatūra kontakto zonoje, o trinties momentas dėl alyvos klampio h bei kontakto tamprumo E' sumažėjimo - sumažėti. Taigi metalopolimerinės dangos efektyvumas mažinant trinties momentą ir didinant atsparumą dilimui turėtų reikštis esant didesniems greičiams.

Trinties poroje sukūrus reguliuojamą nedidelės temperatūros režimą (pavyzdžiui, alyvos temperatūrą išlaikant pakankamai maža) alyvos vidinis klampis ir RSŽ tamprumas išliks nekintamas. Galima spėti, kad tuomet tepimo sąlygos ims labiau panėšėti į hidrodinaminio tepimo sąlygas ir trinties momentui galima būtų taikyti formulę (2.2), o ne (2.3). Tokiu atveju didėjant greičiui trinties momentas tam tikrą laiką didėtų (2.2 pav.). Tą parodė ir V.Wollesen'o tyrimai.



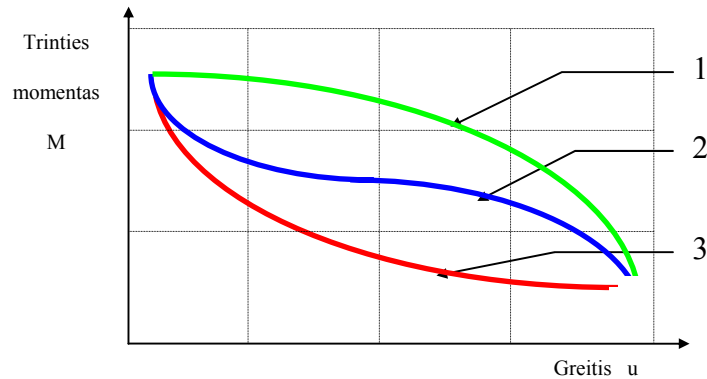
2.2 pav. Trinties poros RSŽ-velenas trinties momento priklausomybė nuo veleno sūkių dažnio esant nereguliuojamai temperatūrai (1 - paprastas velenas, 2 - velenas su metalopolimerine danga) ir pastoviai temperatūrai (3 - paprastas velenas, 4 - velenas su metalopolimerine danga)

Specialūs metaloorganiniai alyvos priedai tepamoje trinties poroje metalas-elastomeras turėtų iš esmės pakeisti tepimo sąlygas, sukurdami išrankinio pernešimo efektą.

Tačiau IPE tyrinėjimai parodė, kad trinties porose veikiant IPE trinties koeficientas ne tik sumažėja, bet ir jo keitimasis, didėjant paviršiaus apkrovai yra kitoks nei tomis pačiomis sąlygomis, bet nesant IPE. Esant IPE ir didėjant greičiui susikuria sąlygos, vis artimesnės hidrodinaminėms tepimo sąlygoms.

Taikant šią ypatybę trinties porai RSŽ-velenas tai turėtų pasireikšti po tam tikro darbo laiko, kai kontakto zonoje susiformuoja servovitinė plėvelė ir galutinai pasikeičia trinties ir tepimo sąlygos (2.3 pav.). Tokia plėvelė turėtų garantuoti tam tikrą nuolatinį kontaktuojančių paviršių atskyrimą (1.2 pav.), ir kartu mažinti jų elastinių savybių įtaką tepimo sąlygoms. Tai reikštų, kad, esant didesniems greičiams, trinties momentas nemažėtų dėl RSŽ elastomero tamprumo mažėjimo, taigi formulę (2.3) mažiau tikėtų priklausomybei išreikšti.

Tačiau antra vertus, esant vidutiniams greičiams, labiausiai reikštų IPE sukeliančių priedų tribologinis efektyvumas, t.y. mažėtų trinties momentas ir tuo pačiu didėtų atsparumas dilimui.



2.3 pav. Trinties poros RSŽ-velenas trinties momento priklausomybė nuo veleno sūkių dažnio, esant nereguliuojamai alyvos temperatūrai: 1 - kontrolinis trinties poros variantas; 2 - naudojant IPE sukeliančius priedus, darbo pradžioje; 3 - naudojant IPE sukeliančius priedus, po tam tikro darbo laiko pilnai susiformavus servovitinei plėvelei

3. TYRIMŲ OBJEKTAS IR METODIKA

Pagrindiniai trinties porų tribologinio patikimumo rodikliai yra sujungimo trinties nuostolių minimizavimas bei ilgaamžiškumas. Tačiau skirtingų trinties porų šie rodikliai gali būti skirtingai įvertinami. Pavyzdžiui, degalų siurblių precizinėms poroms labai svarbus kokybinis ilgaamžiškumo aspektas, t.y. porų sugebėjimas siurblio darbu metu garantuoti pakankamo lygio ciklinį degalų tiekimą. Sandarinimo trinties poroms svarbus ne tik jų darbo resursas, t.y. laikas, kurio metu jos užtikrina mašinos korpuso sandarumą, bet ir minimalūs trinties nuostoliai, kurie leidžia sutaupyti energijos išteklius. Todėl nors tribologiniam patikimumui didinti naudojamos tos pačios tribotechninės medžiagos, turi būti matuojami skirtingi skirtingų trinties porų parametrai.

3.1. Bandymuose naudotų tribotechninių medžiagų savybės ir panaudojimo metodika

FOLEOX yra skystas lengvai garuojantis polimeras, sudarytas iš fluoro oligomerinių junginių su deguonimi ir anglimi. Kadangi ši tepimo ir sustiprinimo antiadhezinė medžiaga, ja padengus detalės paviršius, sudaro junginius su metalu, tai danga apibūdinama kaip metalopolimerinė.

Prieš padengimą detalės ar bandinio paviršius nuriebalinamas. Po to pageidautina paviršius įkaitinti iki 80°C temperatūros ir atvėsinti iki kambario temperatūros. Po pirmo padengimo detalės paviršius paliekamas 20...30 minučių džiuoti, po to padengimo ir nudžiovinimo procedūra pakartojama. Jei po antro padengimo detalės paviršius vėl pakaitinamas, susiformuoja geresnės struktūros danga.

Precizinėms poroms atnaujinti buvo naudojamas 10 kartų mažesnės koncentracijos (0,1 %) FOLEOX. Plunžeriniai stūmokliai ir įvorės į FOLEOX skystį buvo panardinami 3 kartus su 15...20 min intervalu džiovinimui kambario temperatūroje.

Specialūs alyvos priedai **SURM** ir **MKF** trinties poroms panaudojami remiantis išrankinio pernešimo efektu (1.2 pav.). Specialius alyvos priedus naudoti labai paprasta: jie pilami į trinties poros alyvos apytakos sistemą. Priedo SURM pilama nuo 0,2 iki 1,5 % alyvos tūrio; priedo MKF - nuo 0,15 iki 0,3 %.

Metaloorganinė kompozicija **SURM-VN** skirta atnaujinti degalų siurblių precizines poras, įpilant ją į degalus (5% nuo degalų tūrio). Šis atnaujinimas vyksta precizinių porų paviršiumi padengiant plėvele, kuri susidaro panašiai kaip panaudojus IPE.

3.2. Precizinių porų tyrimų objektas ir metodika

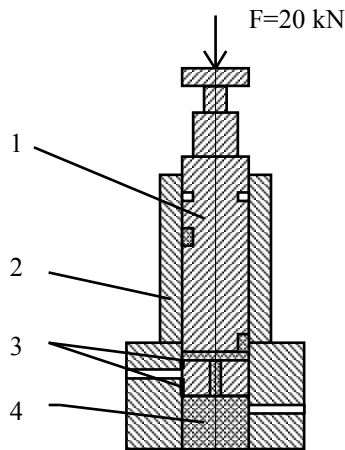
Tyrimų objektas buvo eilinių aukšto slėgio degalų siurblių UTN-5 plunžerinės poros, jų susidėvėjimas iki siurblio remonto bei nudilimo pobūdis. Taip pat buvo tirta galimybė atnaujinti plunžerines poras panaudojant dangą FOLEOX ir kompoziciją SURM-VN.

Iš pradžių statistiškai buvo įvertinamas plunžerinių porų susidėvėjimas iki siurblio remonto pagal sandarumą. Bandymuose plunžerinių porų sandarumas (t_s) buvo nustatomas pagal degalų (4) prasiveržimo per plyšį (3) tarp plunžerinio stūmoklio (1) ir plunžerinės įvorės (2) laiką sekundėmis, apkraunant stūmoklį jėga $F = 20$ kN standartiniame prietaise KI-1640A.

Vėliau plunžerių sandarumas buvo matuojamas prieš ir po apdoravimo FOLEOX ir SURM-VN medžiagomis (pagal 3.1. skyrelyje aprašytą metodiką).

Vėliau buvo palygintas siurblio ciklinis degalų tiekimas V_{100} per 100 surinkus siurblių iš nudilusių plunžerinių porų ir panaudojus kompoziciją SURM-VN uždaro ciklo degalų siurblių bandymo ir reguliavimo stende KI-22205. Tame pačiame stende buvo palygintas analogiškų pagal pradinį sandarumą (netinkamų naudojimui) plunžerinių porų ir porų,

padengtų FOLEOX danga, ciklinis degalų tiekimas. Taip pat buvo nustatytas šitaip atnaujintų porų padidėjusio degalų tiekimo išsilaikymas darbo metu.



3.1 pav. Plunžerinių porų sandarumo matavimo schema

Po bandymų ant stendo elektroniniu mikroskopu Jeol-Scanning Microscope JSM-840A buvo ištirtas FOLEOX padengtos precizinės poros darbinis paviršius prie plunžerio galo, kur poros darbo metu būna didžiausios apkrovos ir nudilimas.

3.3. Sandarinimo porų tyrimų objektas ir metodika

Buvo tiriama polimerinės veleno dangos FOLEOX, metaloorganinių alyvos priedų SURM ir MKF bei jų kombinacijų įtaka trinties poros RSŽ-velenas tribologinėms savybėms.

Bandyti tribotechninių medžiagų variantai pateikti 3.1 lentelėje.

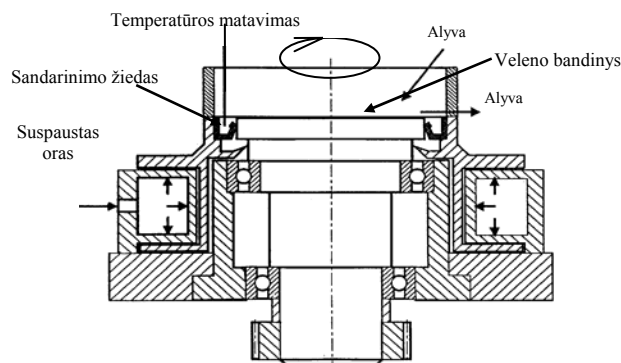
Bandymų metu buvo matuojamas trinties momentas, alyvos temperatūra, temperatūra kontakto zonoje, trinties poros nudilimas.

Trinties momentas ir temperatūra buvo matuojami keičiant veleno sūkių dažnius (480, 960, 1 200, 1 440, 1 680, 1 920, 2 400, 3 120, 3 600 r/min). Kiekvieno varianto trinties pora stende dirbo nuo 26 iki 120 valandų.

Trinties momentas buvo matuojamas Hamburgo-Harburgo technikos universitete sukurtuose RSŽ trinties momento matavimo vertikaliajame (3.2 pav.) ir horizontaliajame bandymų stenduose aerostatinio guolio metodu.

3.1 lent. Trinties poros RSŽ-velenas bandymų rūšys ir jų žymėjimas

Varianto žymėjimas	Bandymai	Velenas	Tepamoji terpė	Radialinis sandarinimo žiedas
Kontrolinis variantas - KV	trinties mom. horiz. stende - T trinties mom. vertik. stende - G dilimas ilgalaik. band. stende -D	Grūdintas plienas C45 1.0503 (DIN)	variklinė alyva Pentosin SAE 15W-40 CE/SG	75FKM 585 (Firma Freudenberg) iš fluoro kaučiuko
Vn - Žn	T, G, D	KV	KV	KV
Vn-SURM-Žn	G, D	KV	su alyvos priedu SURM	KV
Vn-MKF-Žn	G, D	KV	su alyvos priedu MKF	KV
Vf - Žn	T, G, D	su danga FOLEOX	KV	KV
Vf-SURM-Žn	G, D	su danga FOLEOX	su alyvos priedu SURM	KV
Vf-MKF-Žn	D	su danga FOLEOX	su alyvos priedu MKF	KV



3.2 pav. Radialinio sandarinimo žiedo padėtis vertikaliajame stende ir bandymų schema.

Alyvos temperatūra vertikaliajame stende buvo nereguliuojama, o tik fiksuojama galimai arti kontakto zonos. Šiame stende buvo naudojamas nedidelis alyvos kiekis (~ 200 ml). Horizontaliajame stende alyvos temperatūra buvo nustatyta 70°C ir automatiškai išlaikoma viso matavimo ciklo metu, o alyvos kiekis sistemoje buvo artimas variklio alyvos tūriui. Dėl šių priežasčių skiriasi vertikaliajame ir horizontaliajame stende išmatuotų trinties momentų absoliutiniai dydžiai ir kreivių tendencijos ir lūžiai.

Trinties poros ilgaamžiškumo bandymams buvo naudojamas dilimo stendas, taip pat sukurtas Hamburg-Harburgo TU mokslininkų. Dilimo bandymai buvo vykdomi 500 valandų 1500 ir 3000 r/min greičiais. Po bandymų buvo matuojamas trinties porų nudilimas. Veleno bandinių nudilimas buvo matuojamas pagal nudilimo griovelio gylį panaudojant paviršiaus profilogramas, padarytas šiurkštumo matavimo prietaisu Perthometer S6P-PRK. RSŽ nudilimas buvo įvertinamas pagal RSŽ kontakto su veleno juostelės plotį, išmatuotą optiniu mikroskopu Leitz M3.

Po ilgaamžiškumo bandymų buvo padaryta veleno nudilusio paviršiaus optinė, cheminė ir šiurkštumo analizė elektroniniu mikroskopu JSM-840A bei atominiais jėgos mikroskopais AFM Qscope-250 ir DI 3000 SPM.

4. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APIBENDRINIMAS

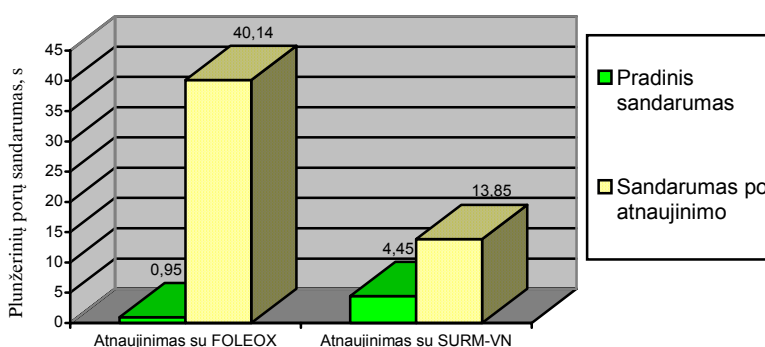
4.1. Precizinių porų tyrimo rezultatai

Precizinių porų sandarumo matavimai parodė, kad maždaug ~ 20,3 % visų kapitaliai remontuojamų degalų siurblių precizinių porų yra netinkamos dėl nepakankamo sandarumo ($t_s < 5$ sek.).

Buvo palygintas plunžerinių porų sandarumas prieš ir po jų atnaujinimo tribotechninėmis medžiagomis FOLEOX ir SURM-VN. Nustatyta, kad netinkamas susidėvėjęs poras (pradinis sandarumas svyravo nuo 0 iki 3,0 s) padengus FOLEOX danga, visų porų sandarumas tapo didesnis nei 5 s ($t_s \geq 5$ s), o vidutinis sandarumas siekė 40,14 sek. Plunžerines poras apdorojus kompozicija SURM-VN sandarumas vidutiniškai padidėjo 13,85 sek. arba 4,11 karto (4.1 pav.).

Degalų siurblių ciklinio degalų tiekimo bandymai parodė, kad naudojant kompoziciją SURM-VN degalų tiekimas padidėjo atskirose siurblio plunžerinių porų sekcijose nuo 2 iki 31 % (vidutiniškai 8,6 %). Panaudojus tokio paties pradinio sandarumo poras, padengtas FOLEOX danga, ciklinis degalų tiekimas padidėjo nuo 3 iki 92 % (vidutiniškai 21,8 %).

Poros su FOLEOX danga buvo išbandytos ant darbinio siurblio su regulatoriumi siurblio bandymų stende. Bandymai parodė, kad siurbliui išdirbus daugiau kaip 40 valandų ciklinis degalų tiekimas ir esant darbiniam sūkių dažniui, ir reguliavimo bei paleidimo dažniams jau matavimų pradžioje pradėjo didėti, po to stabilizavosi ir laikėsi pastoviai didesnis nei darbo pradžioje.



4.1 pav. Plunžerinių porų sandarumo atstatymas naudojant tepimo ir sustiprinimo antiadhezinę medžiagą FOLEOX ir metalizuojančią kompoziciją SURM-VN

Ištyrus plunžerio, padengto FOLEOX danga, cilindrinio galo darbinį paviršių elektroniniu mikroskopu galima matyti, kad didžiausią įtaką plunžerių ilgaamžiškumui daro abrazyvinis dilimas, be to paviršiuje galima nustatyti hidroerozinio arba kavitacinio dilimo požymius. Cheminė analizė parodė, kad ant plunžerio paviršiaus tarp kitų cheminių elementų yra fluoro, būdingo FOLEOX polimeriniams junginiams. Tai paaiškina ilgalaikį dangos tribologinį efektyvumą.

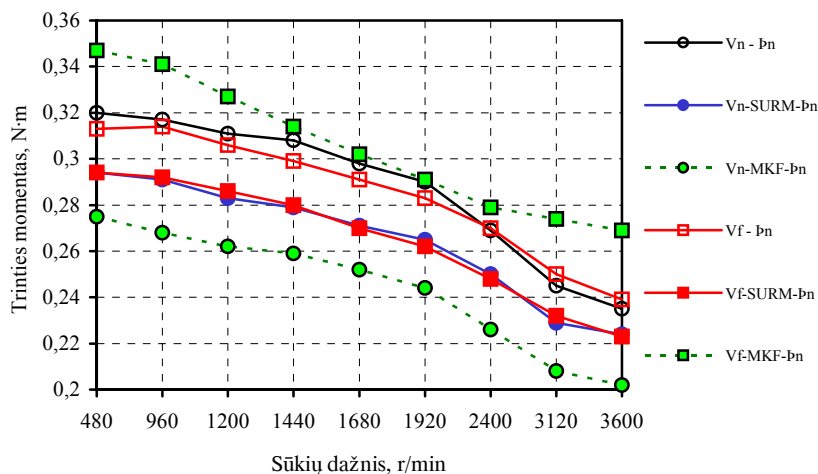
4.2. Sandarinimo porų tyrimo rezultatai

Trinties momento bei alyvos temperatūros matavimai rodo tribotechninių medžiagų efektyvumą mažinant trinties poros RSŽ-velenas trinties nuostolius.

Bandymais vertikaliajame trinties momento matavimo stende nustatyta, kad po 25 valandų darbo dauguma naudotų medžiagų sumažina trinties momentą (4.2 pav.).

Atliekant bandymus šiame stende, kuriame alyvos kiekis buvo panašus į variklio alyvos tūrį, o alyvos temperatūra išlaikoma pastovi 70 °C, gauname kitokią trinties momento kreivių tendenciją. Šiuo atveju, nepriklausomai nuo sūkių dažnio, alyvos klampis išlieka pastovus ir todėl nemažėja vidinė alyvos trintis. Todėl trinties momentas didėjant sūkių dažniui taip pat turi tendenciją didėti (4.3 pav.).

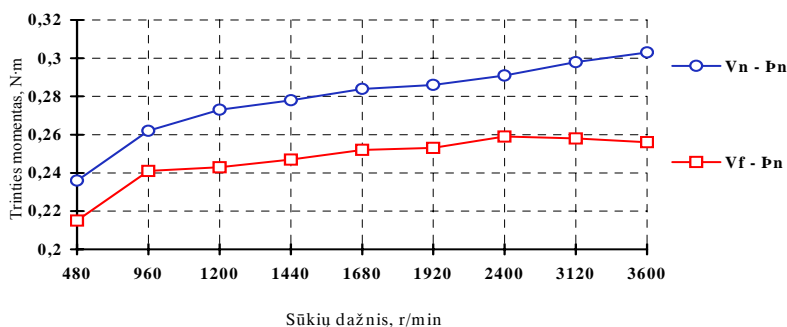
Bandymų rezultatai rodo, kad danga FOLEOX sumažina trinties momentą trinties poroje, tačiau esant nereguliuojamam temperatūros režimui šis efektas mažėja didėjant alyvos temperatūrai, ir esant didesniems greičiams (daugiau nei 2400 r/min) trinties momentas jau yra toks pats kaip ir kontrolinio varianto. Išlaikant alyvos temperatūrą pastovią, FOLEOX gerokai sumažina trinties momentą ypač prie aukštesnių apsisukimų. Šiuo atveju sūkių dažniui didėjant trinties momentas netgi turi tendenciją mažėti, tuo tarpu, kai kontroliniame variante jis toliau didėja.



4.2 pav. Trinties momento priklausomybė nuo sūkių dažnio esant nereguliuojamam temperatūros režimui po 25 h trinties poros darbo (įvairūs bandymų variantai). Vertikalūs bandymų stendas

Specialusis alyvos priedas SURM sumažina trinties momentą. Labiausiai jis sumažėja esant vidutiniam sūkių dažniui - tarp 1000 ir 1900 r/min ir sudaro apie 10 %. Be to šis priedas sąlygoja nereikšmingą alyvos temperatūros sumažėjimą esant nereguliuojamam temperatūros režimui.

Panaudojant priedą SURM kartu su FOLEOX danga ant veleno trinties momentas sumažėja maždaug tiek pat, kaip naudojant kiekvieną tribotechninę medžiagą atskirai. Tačiau ši kombinacija gerokai sumažina alyvos temperatūrą.



4.3 pav. Trinties poros sandarinimo žiedas - velenas trinties momento priklausomybė nuo sūkių dažnio įvairiomis trinties sąlygomis. Bandymai horizontaliajame trinties momento bandymų stende. Pastovus alyvos temperatūros režimas: 70 °C

Padarius ilgalaikius trinties momento matavimus reguliuojamame temperatūros režime buvo įsitikinta, kad FOLEOX dangos efektyvumas trinties momento atžvilgiu, lyginant su kontroliniu trinties poros variantu, išlieka pakankamai ilgą laiką. Po 250 darbo valandų trinties momento sumažėjimas siekia 24,5%. Šis trinties momento sumažinimas ypatingai efektyvus esant didesniam sūkių dažniui.

Ilgalaikiai bandymai, atlikti nereguliuojamame temperatūros režime esant nedideliui alyvos kiekiui, rodo, kad trinties poros su FOLEOX danga trinties momentas, kaip ir kontrolinio trinties poros varianto, darbo eigoje esant mažesniems greičiams, išskyrus pradinį mažėjimą, išlieka stabilus. Esant didesniems sūkių dažniams trinties momentas kinta nežymiai. Alyvos priedas SURM yra efektyvesnis po tam tikro darbo laiko ir kai mažesnis sūkių dažnis. Trinties porai dirbant su priedu SURM trinties momentas sūkių dažnio atžvilgiu skirtingai nei kontrolinio varianto, iš pradžių labai keičiasi, bet po to ilgainiui stabilizuojasi. Tai galima paaiškinti servovitinės plėvelės formavimusi trinties poroje.

Tribotechninių medžiagų efektyvumą labiausiai atspindi jų sugebėjimas padidinti triboporos atsparumą dilimui. Todėl ypač svarbūs buvo trinties poros RSŽ - velenas ilgaamžiškumo bandymai. Išbandyti įvairūs tribotechninių medžiagų variantai pateikti 4.1 lentelėje.

Rezultatai rodo, kad visi variantai sumažina veleno nudilimą trinties poroje. Labiausiai nudilimą mažina danga FOLEOX (beveik 2 kartus sumažina veleno nudilimą), ir jos kombinacija su alyvos priedu MKF. Taip pat labai perspektyvus yra ir vien alyvos priedo SURM (sumažina nudilimą 1,6 karto) panaudojimas. Abiejų medžiagų: dangos FOLEOX ir priedo SURM panaudojimas vienu metu neduoda tokio efekto, kaip šių medžiagų naudojimas atskirai. Tai rodo, kad abiejų medžiagų efektyvumas remiasi skirtingais principais, kurie nėra suderinami.

4.1 lent. Grūdinto plieno veleno bandinių nudilimas po 500 valandų darbo su RSŽ, esant 3 000 r/min sūkių dažniui ir įvairioms tribotechninių medžiagų kombinacijoms

Dangų tipas	Kontrolinio veleno bandymai			Veleno su FOLEOX danga bandymai		
	Vn-Žn	Vn-SURM-Žn	Vn-MKF-Žn	Vf-Žn	Vf-SURM-Žn	Vf-MKF-Žn
Tribomedžiagų kombinacijos						
Vidutinis nudilimo griovelio veleno gylis, mm	18.5	11.3	13.1	9	14	11

Padarius ilgalaikius (iki 1500 h) nudilimo bandymus, buvo įvertintas ne tik veleno, bet ir RSŽ nudilimas. Rezultatai rodo, kad tribotechninių medžiagų veikimas yra efektyvus abiejų tribosistemos kontrkūnų atžvilgiu. Visos tribotechninės medžiagos yra panašiai efektyvios ir RSŽ nudilimą vidutiniškai sumažina 1,7 ... 1,9 karto.

Pagal veleno trinties paviršiaus analizės rezultatus galime spręsti, kad veleniui dirbant su polimerine danga FOLEOX susiformuoja kitokia nei kontrolinio veleno struktūra. Šiuo atveju galime matyti smulkius išgaubimus ant paviršiaus, kuris dėl tokios struktūros turėtų būti atsparesnis dilimui.

Panaudojus metaloorganinį alyvos priedą SURM, ant dilimo paviršiaus susiformuoja aptaki struktūra, kuri netiesiogiai gali liudyti apie išrankinio pernešimo efekto veikimą ir servovitinės plėvelės susidarymą.

Apibūdinant dilimo mechanizmą galima spėti, kad veleną su danga FOLEOX mažiau veikia abrazyvinis dilimas, o paviršiuje, dirbusiame su alyvos priedu SURM, nors bendras nudilimas nedidelis, yra abrazyvų poveikio požymių.

4.3. Trinties momento skaičiavimo modelio sukūrimas ir trinties sąlygų įvertinimas

Trinties ir darbo sąlygas radialinio sandarinimo žiedo ir veleno kontakto zonoje bandoma išreikšti tiek klasikinio hidrodinaminio, tiek elastohidrodinaminio tepimo sąlygų formulėmis.

Trinties momento formulę (2.2), gautą pagal **hidrodinaminio tepimo modelį** galima pritaikyti radialinio sandarinimo žiedo ir veleno kontaktui.

Kontakto plotis b ir alyvos plėvelės storis h radialiniuose sandarinimo žieduose priklauso nuo apkrovos, arba, kitaip sakant, nuo radialinio sandarinimo žiedo radialinės jėgos. Kadangi bandymuose buvo naudojami vienodo tipo, vienodų elastinių savybių ir radialinės jėgos RSŽ bei tokie patys veleno bandiniai, tai veleno spindulį, kontakto plotį ir alyvos plėvelės storį galima laikyti pastoviais dydžiais. Nekintamu dydžiu mūsų bandymų sąlygomis galima laikyti ir proporcingumo koeficientą x formulėje (2.2).

Alyvos klampis yra atvirkščiai proporcingas alyvos temperatūrai. Ramano-Frenkelio formulę galima suprastintai išreikšti taip:

$$h = k_a / T \quad (4.1)$$

čia: k_a - koeficientas, priklausantis nuo alyvos rūšies, Pa·s·°C; T - alyvos temperatūra, °C.

Taigi, (2.2) formulę pritaikius mūsų bandymų sąlygoms ir pastovius dydžius išreiškus apibendrinančiu koeficientu a_h , bei greitį išreiškus per sūkių dažnį n , gautume tokią apytikslią priklausomybę:

$$M = (a_h \cdot T \cdot n^{-1})^{-1} \quad (4.2)$$

čia: a_h - koeficientas, apibendrinantis nekintamus bandymų parametrus, pritaikant hidrodinaminei tepimo sąlygų priklausomybei.

Radialiniam sandarinimo žiedui taikant **elastohidrodinaminio tepimo modelį**, reikia analogiškai pertvarkyti formulę (2.3). Šiuo atveju gautume:

$$M = (a_{eh} \cdot T^{-1} \cdot n)^{-1} \quad (4.3)$$

čia: a_{eh} - koeficientas, apibendrinantis nekintamus bandymų parametrus, pritaikant elastohidrodinaminei tepimo sąlygų priklausomybei.

Atlikus ilgalaikius išsamius bandymus ir turint pakankamai didelį duomenų masę buvo bandoma sukurti trinties poros radialinis sandarinimo žiedas - velenas trinties momento modelius naudojant įvairius tribotechninių medžiagų variantus. Šiuos skaičiavimo modelius buvo stengiamasi priartinti prie teorinių pagal tepimo sąlygas išvestų formulių (4.2 ir 4.3).

Pasinaudojant modeliavimo metu gautomis funkcijomis, kurių duomenų atitikimo koeficientai modeliuotiems variantams lygūs apie 90,4 ... 99,9 %, buvo išvesta trinties poros RSŽ-velenas trinties momento priklausomybės nuo sūkių dažnio, alyvos temperatūros ir trinties poros išdirbio bendra formulė:

$$M=[a_m+(b_m/b_t) \cdot n^i \cdot (T^k - a_t)]^j \quad (4.4)$$

[vairių tribotechninių medžiagų variantų formulės pateiktos 4.2 lentelėje.

Lyginant gautų trinties momento skaičiavimo formulių pagrindinių kintamųjų parametrų (alyvos temperatūros T ir sūkių dažnio n) laipsnio rodiklius galime daryti išvadą, kad kontrolinio trinties poros varianto ir varianto su FOLEOX metalopolimerine danga ant veleno formulių laipsnio rodikliai nesiskiria. Vadinasi trinties poros tepimo mechanizmas abiejais atvejais turėtų būti vienodas. Be to šie laipsnių rodikliai yra artimesni EHD tepimo modelio formulėi (4.3). Tokie patys rodikliai gauti ir naudojant dangą FOLEOX kartu su specialiu alyvos priedu MKF.

4.6 lent. Išvestinės trinties momento ir alyvos temperatūros funkcijos.

Trinties poros variantas	Trinties momento funkcija		Alyvos temperatūros funkcija		Išvestinė formulė
	Modeliavimo funkcija	Taikomoji formulė	Modeliavimo funkcija	Taikomoji formulė	
Vn - Žn	$y^{-1}=a+bx$	$M^{-1}=a_m+b_m n$	$y^{-1}=a+bx^{-0.5}$	$T^{-1}=a_t+b_t n^{-0.5}$	$M=[a_m+(b_m/b_t) n^{1.5}(T^{-1}-a_t)]^{-1}$
Vn-SURM-Žn	$y^{-1}=a+bx^{1.5}$	$M^{-1}=a_m+b_m n^{1.5}$	$y^{-1}=a+bx^{0.5}$	$T^{-1}=a_t+b_t n^{0.5}$	$M=[a_m+(b_m/b_t) n(T^{-1}-a_t)]^{-1}$
Vn-MKF-Žn	$y^{-1}=a+bx^{1.5}$	$M^{-1}=a_m+b_m n^{1.5}$	$y^{-1}=a+bx^{-0.5}$	$T^{-1}=a_t+b_t n^{-0.5}$	$M=[a_m+(b_m/b_t) n^2(T^{-1}-a_t)]^{-1}$
Vf - Žn	$y^{-1}=a+bx$	$M^{-1}=a_m+b_m n$	$y^{-1}=a+bx^{-0.5}$	$T^{-1}=a_t+b_t n^{-0.5}$	$M=[a_m+(b_m/b_t) n^{1.5}(T^{-1}-a_t)]^{-1}$
Vf-MKF-Žn	$y^{-1}=a+bx$	$M^{-1}=a_m+b_m n$	$y^{-1}=a+bx^{0.5}$	$T^{-1}=a_t+b_t n^{0.5}$	$M=[a_m+(b_m/b_t) n^{1.5}(T^{-1}-a_t)]^{-1}$

Naudojant alyvos priedą SURM ir veleną be dangos laipsnio rodikliai tampa artimesni hidrodinaminio tepimo modelio rodikliams. Nors sūkių dažnio rodiklio reikšmė lieka artimesnė EHD modeliui, bet alyvos temperatūros laipsnio rodiklis sutampa su hidrodinaminio tepimo formule (4.2). Tai netiesiogiai liudija, kad priedo SURM sukurta servovitinė plėvelė kontakto zonoje, gali suteikti trinties poroms, iš esmės dirbančioms EHD sąlygomis, hidrodinaminio tepimo požymių.

4.4. Tribotechninių medžiagų struktūros ir procesų trinties kontakto zonoje analizė

FOLEOX metalopolimerinės dangos medžiaga, kurią sudaro fluoro oligomeriniai junginiai su deguonimi ir anglimi pasižymi netirpumu alyvoje. Todėl norint šia medžiaga padengti paviršius, reikia atitinkamai jį paruošti. Tačiau kartu tai leidžia susidaryti stabiliam ryšiams su pagrindinės medžiaga.

V.Gubanov'o, P.Troičianskaja'os, J.Ovčinnikov'o tyrimai rodo, kad daugiasluoksnė FOLEOX plėvelė ne deformuoja, o sustiprina metalo paviršinius sluoksnius. Fluoro oligomerų reakcijos su oksiduotomis metalo paviršiaus dalimis sumažina paviršiaus defektų skaičių ir padidina mikrokietumą. Tokia plėvelė trukdo adheziniams ryšiams tarp kontaktuojančių paviršių susidaryti ir apsaugo paviršius nuo adhezinio irimo.

Negalima paaiškinti FOLEOX dangos stabilumo trinties poros ilgalaikio darbo metu pradiniais chemisorbciniais oligomerų junginiais su aktyviomis metalo paviršiaus grupėmis po FOLEOX užtepimo ant metalo. Esant didelėms apkrovoms ir temperatūroms kontakto zonoje (1.2. lentelė ir 1.1 pav.), taip pat pakankamai dideliu, lyginant su plona (1 ... 2 μm) FOLEOX danga, nudilimui (4.1 lentelė) nekieta polimerinė danga, be abejonės, turėtų būti nutrinta. Tačiau FOLEOX padengtų trinties porų ilgalaikis tribologinis efektyvumas (4.1 ir 4.2. skyreliai), kontakto paviršiaus optinė analizė (4.2. skyrelis) bei kontakto paviršiaus cheminė analizė po trinties poros 500 darbo valandų rodo, kad FOLEOX danga ir jos tribologinis poveikis ilgai išlieka stabilus.

K.P.Thiessen, E.Winkler ir U.Noack tyrimai parodė, kad kontaktuojančių paviršių darbo metu fluoro oligomerų dangos plėvelės pasižymi atsinaujinimo cheminėmis reakcijomis. Šių reakcijų dėka FOLEOX danga padengtas paviršius irgi keičia savo cheminę struktūrą, o dėl trinties kontaktų - ir fizinę sandarą.

Alyvos priedo SURM tribologinis efektyvumas aiškintinas išrankinio pernešimo efekto (IPE) sukūrimu trinties porų kontakto zonoje (1.4. skyrelis). Priedo SURM cheminėje sudėtyje esantys organiniai junginiai su minkšto metalo (vario, alavo) atomais pasižymi saviorganizacinėmis savybėmis trinties kontakto sąlygomis. Veikiant metaloorganinių kompozicijų paviršiaus aktyvioms molekulėms, trinties paviršių kontaktų zonoje susiformuoja 1 ... 2 mm storio servovitinė metaloorganinių junginių (su variu ir alavu) plėvelė. Paviršiams kontaktuojant ši plėvelė perima apkrovas ir įtempimus ir dėl susiorganizavimo proceso pastoviai atsinaujina.

Kadangi tiek polimerinės medžiagos FOLEOX, tiek metaloorganinio priedo SURM tribologinio poveikio ilgaamžiškumas grindžiamas cheminiais ryšiais su kontaktuojančiais trinties paviršiais, tai tas medžiagas panaudojant vienu metu, negaunamas toks tribologinis efektyvumas, kaip jas naudojant atskirai. To priežastis gali būti nesuderinami tribologiškai reikšmingi sudėtingi cheminių reakcijų kompleksai, vykstantys naudojant tiek FOLEOX, tiek SURM.

5. IŠVADOS

1. Metalopolimerinės tribotechninės medžiagos SURM-VN ir FOLEOX padidina dyzelinių variklių degalų siurblių plunžerinių porų sandarumą ir nuo jo priklausantį ciklinį degalų tiekimą (SURM-VN - vidutiniškai apie 8,6%, FOLEOX ~ 21,8%). Pagal medžiaga FOLEOX sustiprintų plunžerinių porų laboratorinius bandymus (40 h)

padidėjęs degalų tiekimas išlieka stabilus. Po šių bandymų padaryta cheminė analizė parodė, kad trinties paviršiuje išlieka fluoras.

2. Plunžerių, padengtų FOLEOX danga, trinties paviršių tyrimų rezultatai rodo, kad didžiausią įtaką jų ilgaamžiškumui daro abrazyvinis dilimas, be to yra hidroerozinio bei kavitacinio dilimo požymių.
3. Danga FOLEOX sumažina trinties momentą sandarinimo poroje radialinis sandarinimo žiedas - velenas: a) esant nereguliuojamam alyvos temperatūros režimui didėjant sūkių dažniui ir alyvos temperatūrai efektas mažėja; b) esant reguliuojamam alyvos temperatūros režimui ($T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$) didinant sūkių dažnį efektas didėja ir siekia apie 15 ... 20 %.
4. Alyvos priedų SURM ir MKF naudojimas sumažina sandarinimo poros trinties momentą. Didžiausias alyvos priedo SURM naudojimo efektas esant nereguliuojamam temperatūros režimui (~ 10 %) dėl susiformavusios servovitinės plėvelės pasireiškia po tam tikro laiko.
5. Danga FOLEOX iki 2 kartų padidina veleno ir radialinių sandarinimo žiedų atsparumą dilimui esant didesniai sūkių dažniui (3000 r/min). Metalo-polimerinis alyvos priedas SURM atsparumo dilimui požiūriu yra efektyvesnė esant vidutiniam sūkių dažniui (1500 r/min) atsparumas dilimui padidėja iki 2,7 karto). Dėl skirtingo medžiagų FOLEOX ir SURM veikimo mechanizmo kombinuotas šių medžiagų panaudojimas nėra efektyvus.
6. Veleno nudilimo griovelio mikroskopiniais tyrimais nustatyta, kad: a) veleno paviršiuje su FOLEOX danga, skirtingai nuo kontrolinio veleno, susiformuoja smulkūs išgaubimai, kurie sąlygoja atsparumo dilimui padidėjimą; b) naudojant metalopolimerinį alyvos priedą SURM trinties paviršiuje susiformuoja aptaki struktūra, kas liudija apie išrankinio pernešimo efekto pasireiškimą ir servovitinės plėvelės susidarymą.
7. Naudojantis sudarytais trinties momento skaičiavimo modeliais nustatyta: a) sandarinimo trinties poros kontrolinio varianto ir varianto su FOLEOX danga tepimo sąlygų modeliai yra vienodi ir atitinka elastohidrodinaminio tepimo modelį; b) trinties poroje naudojant metalopolimerinę kompoziciją SURM tepimo sąlygos yra artimesnės hidrodinaminio tepimo modeliui. To priežastis gali būti servovitinės plėvelės kontakto zonoje susidarymas.
8. Dyzelinių variklių degalų siurblių plunžerinėms bei sandarinimo poroms tikslinga naudoti metalopolimerines dangas (FOLEOX) arba alyvos priedus (SURM arba MKF). Šių medžiagų panaudojimo technologijos yra paprastos, o jų naudojimas žymiai sumažina trinties nuostolius ir padidina trinties porų ilgaamžiškumą.

PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

1. J.Padgurskas, V.Partikas, Č.Pocius, R.Rukuiža. Nauja precizinių porų atnaujinimo technologija // XXXVIII dėstytojų mokslinės konferencijos trumpi pranešimai: (Mašinų remonto sekcija)/LŽŪA.- Kaunas-Akademija, 1993. - P. 35-36.
2. J.Padgurskas, V.Ramanauskas, R.Rukuiža, V.Serapinas, V.Michailov. Metal-placirating tribologic materials // Studies and materials of 2nd International Techno-Scientific Conference "Influence of production engineering on state of the surface layer '93", T. XII. Nr. 1 / Instytut Badan I Ekspertyz Naukowych. - Gorzow Wlkp., Lubniewice, 1993. - pp 311-316.
3. J.Padgurskas, R.Rukuiža, A.Stakauskas. Metalizuojančių alyvos priedų panaudojimas įdirbti kapitališkai suremontuotiems varikliams SMD-62 // Žemės ūkis: Lietuvos Žemės ūkio Akademijos Mokslo darbai. - Kaunas-Akademija, 1994. - Nr.43. - P. 72-75.
4. J.Padgurskas, V.Ramanauskas, R.Rukuiža, V.Serapinas. Stūmoklinių vidaus degimo variklių patikimumo didinimas panaudojant naujas tribomedžiagas // Konferencijos "Lietuvos mokslas ir pramonė" pranešimų medžiaga: Transporto technologija/KTU. - Kaunas: Technologija, 1994. - P.21.
5. J.Padgurskas, R.Rukuiža, V. Serapinas. Technologinių įrengimų patikimumo didinimas tribotechnologiniais metodais // Konferencijos "Lietuvos mokslas ir pramonė" pranešimų medžiaga: Mechanika-95/KTU. - Kaunas: Technologija, 1995. - P. 123-128.
6. R.Rukuiža, J.Padgurskas, Č.Pocius. Degalų siurblių precizinių porų patikimumo didinimas // Konferencijos "Lietuvos mokslas ir pramonė" pranešimų medžiaga: Mechanika-95/KTU. - Kaunas: Technologija, 1995. - P. 129-134.
7. R.Rukuiža, J.Padgurskas, V.Ramanauskas, V.Serapinas. The improving of nonabrasive antifriction finish processing // Proceedings of IX World Congress on Theory of Machines and Mechanismus. Section: Tribology 1 / Politecnico di Milano.- Milano, 1995. - pp 635-638.
8. R.Rukuiža, J.Padgurskas, V.Ramanauskas, V.Serapinas, V.Mihailov, M.Teodorescu. The increasing of the tribological reliability of mechanical systems // Materials of International Conference TURBO'96. Vol.2., Section: Machine parts/COMOTI - Compania de Motoare cu Turbina si Inginerie.- Bucuresti, 1996. - pp 134-140.
9. R.Rukuiža, J.Padgurskas. Mašinų tribologinio patikimumo valdymo modeliavimas // Konferencijos "Lietuvos mokslas ir pramonė" pranešimų medžiaga: Mechanika-96/KTU. - Kaunas: Technologija, 1996. - P. 303-309.
10. R.Rukuiža, J.Padgurskas, M.Vötter, V.Wollesen. Kompozicinių medžiagų SURM ir FOLEOX bei SiO_2 dangų įtaka trinties poros "sandinimo žiedas - velenas" tribologinėms savybėms // Inžinerija: Lietuvos Žemės ūkio Akademijos Mokslo darbai. - Kaunas-Akademija, 1996. - P. 139-147.
11. R.Rukuiža, J.Padgurskas, M.Vötter, V.Wollesen. Research on the Possibilities to Increase the Longevity of the Friction Pair Radial Lip Seal - Shaft. // Mechanika. - Kaunas: Technologija, 1997. - Nr. 2 (9).. - P. 53-57.
12. R.Rukuiža, J.Padgurskas, M.Vötter, V.Wollesen. Research on the Influence of Composite Materials and SiO_2 Particle Coats on the Tribological Properties of the Friction Pair Radial Lip Seal - Shaft // World Tribology Congress, 8-12 September 1997:

Abstracts of papers/ Mechanical Engineering Publications Limited for the Institution of Mechanical Engineers.- Bury St. Edmunds and London, 1997. - p. 768.

13. R.Rukuiža, J.Padgurskas, A.Pocius, V.Serapinas. The Use of the Metal-Polimeric Tribomaterials for Improvement the Tribological Properties of the Friction Pairs // 2nd International conference "MECHANICS 97"-23-25 September 1997: Proceedings, Part 2 (309), Tribology / Vilnius Technical University. - Vilnius, 1997. - P. 111-118.