

GRAFENO NANODALELĖMIS MODIFIKUOTOS ALYVOS 5W-20 ILGALAIKIS TRIBOLOGINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

Rapolas PEČIOKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: rapolas.peciokas@vdu.lt

Artūras KUPČINSKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: arturas.kupcinskas@vdu.lt

Raimondas KREIVAITIS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: raimondas.kreivaitis@vdu.lt

Santrauka

Alyvos tribologinės savybės yra esminis veiksnys užtikrinant efektyvų mechaninių sistemų darbą ir ilgaamžiškumą. Pastaraisiais metais daug dėmesio skiriama nanodalelėmis modifikuotoms alyvoms, kurios gali pagerinti tepimo savybes, sumažinti trintį ir dilimą. Grafeno nanodalelės, pasižyminčios puikiu mechaniniu stiprumu, cheminiu inertiškumu ir aukštu šiluminiu laidumu, yra vienas iš perspektyviausių tribologinių priedų. Tačiau dauguma tyrimų apsiriboja trumpalaikėmis analizėmis, o ilgalaikiai eksperimentai yra itin reti. Šiame darbe buvo tiriama 5W–20 alyva, modifikuota grafeno nanodalelėmis, naudojant keturių rutulių tribologinį bandymą. Eksperimentai atlikti 1500 aps./min. greičiu, esant cikliniam apkrovos modeliui: 100 ciklų su 20 s pauzėmis iki 1000 ciklų. Trinties momentas buvo registruojamas viso bandymo metu, o dilimo pėdsakai analizuoti mikroskopinėmis priemonėmis. Gauti rezultatai parodė, kad grafeno nanodalelėmis praturtinta alyva reikšmingai sumažino trinties koeficientą ir dilimo dydį, palyginti su standartine 5W–20 alyva. Tyrimo rezultatai rodo, kad ilgalaikiai tribologiniai eksperimentai su grafeno nanodalelėmis gali suteikti naujų įžvalgų apie jų stabilumą ir veiksmingumą ekstremaliomis sąlygomis, o gautos išvados gali būti naudingos tobulinant variklines alyvas bei optimizuojant jų naudojimą automobilių ir pramonės sektoriuose.

Reikšminiai žodžiai: alyva modifikuota nanodalelėmis, 5W–20, grafenas, trinties koeficientas, dilimas, trinties momentas, keturių rutulių mašina.

Įvadas

Dilimas ir dėvėjimasis yra pagrindinės mechaninių sistemų problemos. Mechaninės sistemos tiesiogiai daro įtaką energijos vartojimo efektyvumui, komponentų tarnavimo laikui ir techninės priežiūros išlaidoms. Įprastos variklinės alyvos, pavyzdžiui, tokios kaip 5W–20 yra plačiai naudojamos trinėčiai ir dilimui mažinti, tačiau ilgai jų veiksmingumas mažėja dėl atsiradusios degradacijos ir oksidacijos (Thampi et al., 2021; Ali et al., 2022). Siekiant išspręsti šiuos klausimus, buvo pradėti atlikti įvairūs tyrimai su nanodalelėmis, svarstomi kaip galimi įvairių alyvų priedai (Asrul et al., 2013; Tobar et al., 2024), o grafeno nanodalelės dėl savo unikalių mechaninių, šiluminių ir tribologinių savybių pasižymėjo esančios vienos iš galimai perspektyviausių.

Grafenas yra sudarytas iš vieno anglies atomo sluoksnio ir yra ploniausia ir tvirčiausia kada nors dirbtiniu būdu atrasta anglies alotropinė medžiaga. Jis pasižymi dideliu šiluminiu laidumu ir išskirtiniu mechaniniu atsparumu. Grafenas taip pat buvo tiriamas dėl tepimo savybių gerinimo – įvairūs tyrimai parodė, kad jo įdėjimas į bazines alyvas sumažina trinties koeficientą ir dilimą (Berman et al., 2014; Liu et al., 2022). Grafenas dėl savo unikalių fizinių, mechaninių ir cheminių savybių veiksmingai sumažina metalų tarpusavio sąlytį, sudarydamas apsauginę plėvelę, pagerindamas tepimo savybes, apsaugantis paviršius nuo irimo ir sumažindamas medžiagos degradaciją naudojimo metu (Marlinda et al., 2023).

Naujausiuose tyrimuose toliau tiriama grafeno pagrindu pagamintų alyvų dispersijos stabilumas, kuris yra pagrindinis veiksnys, padedantis išlaikyti stabilias tribologines charakteristikas, pasižymi puikia dispersija užkirsdamas kelią nanodalelių agregacijai ir užtikrinant ilgalaikį stabilumą, ne tik sumažindamas trinties koeficientą, bet ir padidina šiluminį stabilumą, o tai labai svarbu naudojant aukštoje temperatūroje (Alqahtani et al., 2022; Dong et al., 2023). Dispersijos stabilumas reiškia nanodalelių gebėjimą tolygiai pasiskirstyti alyvoje bei išlikti vienalytėje būsenoje ilgesnį laiką, neformuojant agregatų ar nuosėdų. Tai svarbu norint užtikrinti, kad nanodalelės nuolat dalyvautų tribologiniuose procesuose ir neprarastų savo efektyvumo.

Atlikus lyginamąjį tyrimą, grafenu pagerintų alyvų ir su įprastiniais priedais, tokiais kaip molibdeno disulfidas (MoS_2) ir titano dioksido (TiO_2). Rezultatai parodė, kad nors MoS_2 ir TiO_2 gerokai pagerina tepimo savybes, grafenas, pasižymintis puikiomis apkrovos laikymo savybėmis ir cheminiu inertiškumu, lenkia pagal atsparumą dilimui ir bendrą stabilumą (Birleanu et al., 2022; Nagarajan et al., 2023).

Šiuo tyrimu siekiama papildyti esamus grafeno nanodalelėmis modifikuotų alyvų tyrimus, išsamiai analizuojant 5W–20 alyvos tribologines savybes ilgalaikių bandymų sąlygomis. Tyrimo metu vertinami trinties koeficiento pokyčiai, atsparumas dilimui ir sistemos stabilumas per ilgesnį eksploatacijos laikotarpį, siekiant įvertinti grafeno kaip variklinės alyvos priedo veiksmingumą ir tinkamumą praktiniam taikymui.

Tyrimo tikslas – įvertinti grafeno nanodalelėmis modifikuotos variklinės alyvos 5W–20 tribologines savybes, analizuojant trinties koeficiento ir nusidėvėjimo pokyčius ilgalaikio tyrimo metu.

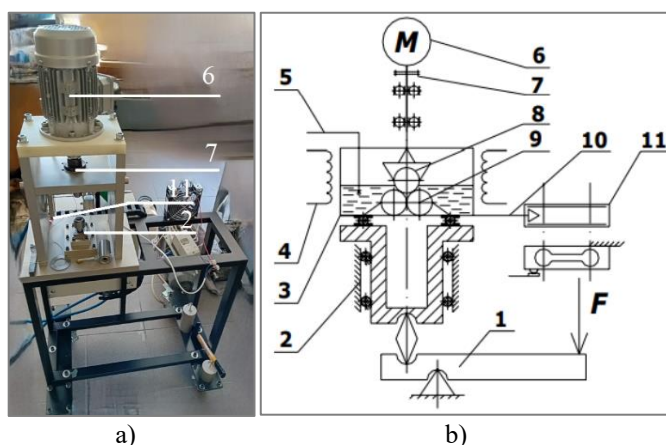
Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Atlikti literatūros analizę panašia tematika.
2. Paruošti eksperimentinio tyrimo metodiką.

3. Eksperimentiškai ištirti nemodifikuotos ir modifikuotos alyvos tribologines savybes.
4. Atlikti rezultatų analizę ir pateikti išvadas.

Tyrimų objektas ir metodai

Šio tyrimo objektas yra SAE 5W–20 klampumo klasės bazinė ir modifikuota su grafeno nanodalelėmis variklinė alyva. Ši alyva pasirinkta dėl plataus pritaikomumo, ji plačiai naudojama įvairiuose vidaus degimo varikliuose, taip pat dėl eksploatacinių savybių yra dažnai atliekami įvairūs tyrimai. Tyrime naudojama pilnai sintetinė alyva 5W–20 „X“ gamintojo, ACEA: C5 klasifikacijos, kuri pasižymi: mažu peleningumu (mažiau sulfatinių pelenų, fosforo ir sieros), mažą trintimi ir klampa, geresniu degalų ekonomikos rodikliu. Alyvai modifikuoti buvo naudojamos nanodalelės grafeno, kurio dalelių dydis $< 2 \mu\text{m}$ ir alyvos koncentracijoje sudarė 0,1 proc. mišinio masės, tokia koncentracija buvo pasirinkta remiantis kitų autorių publikuota literatūra (Alqahtani et al., 2022; Liu et al., 2022; Marlinda et al., 2023). Naudotos grafeno nanodalelės buvo pagamintos pramoniniu būdu ir įsigytos iš gamintojo „X“. Nanodalelės buvo vieno sluoksnio tipo, grynumo >99 proc., miltelių pavidalu. Prieš maišymą jos nebuvo papildomai apdorojamos ar funkcionuojamos. Kadangi realių trinties ir tepimo atvejų yra gana daug, tai ir bandymų metodų yra palyginti daug. Šiame tyrime bandymai atliekami su keturių rutuliukų mašina (žr. 1 pav.) pagal Europos DIN 51350 standartą, kai trys rutuliukai įtvirtinami laikiklyje taip, kad nejudėtų ir yra užpilami bandomuoju tepalu ar, šiuo atveju, modifikuota alyva. Ketvirtas rutuliukas įtvirtinamas variklio velenėlyje, kuris yra prispaudžiamas iš viršaus prie anksčiau minėtų trijų nejudančių rutuliukų ir sukamas pastoviu greičiu. Taip gaunama slydimo trintis labai nedideliame trinties paviršiuje. Dėl metalo tampriosios deformacijos veikiant paviršių sąlyčio vietoje susidaro palyginti didelė lyginamoji apkrova, kurią galima imituoti kaip trintį daugelyje variklio mazgų. Taip pat bandymo metu yra gaunama trinties momento kreivės priklausomybė nuo laiko, iš kurių padaromi trinties momento priklausomybės nuo ciklų grafikai.



Šaltinis: sudaryta pagal M. Pustan (2022)
Source: according to M. Pustan (2022)

1 pav. Keturių rutulių trinties bandymas: a) stendo vaizdas; b) principinė schema; 1 – apkrovos svirtis, 2 – vertikalaus centravimo guolis, 3 – tiriamos medžiagos indas, 4 – šildytuvas, 5 – termopora, 6 – elektros variklis, 7 – mova, 8 – viršutinis sukamas rutulys, 9 – nejudamai įtvirtinti rutuliai, 10 – trinties momentą jėgos jutikliui perduodanti svirtis; 11 – jėgos jutiklis.

Fig. 1. Four-ball friction test: a) view of the bench; b) schematic diagram; 1 – load arm, 2 – vertical centering bearing, 3 – test material vessel, 4 – heater, 5 – thermocouple, 6 – electric motor, 7 – coupling, 8 – upper rotating ball, 9 – four fixed balls, 10 – lever transmitting friction torque to the force sensor; 11 – force sensor.

Be keturių rutulių mašinos stendo tyrimo tribologiniams rezultatams gauti, taip pat buvo naudojama ši įranga ir prietaisai: 50 ml talpos kolbos, mechaninės pipetės, elektroninės svarstyklės Sartorius Entris 224–1S (paklaida 0,1 mg), ultragarsinė vonelė Bandelin Sonorex Digitec, magnetinė maišyklė – TK22 Technokartell, optinis mikroskopas NICON ECLIPSE MA–100, mikroskopo kamera Nikon DS–Fi2 (5 MP spalvota CCD kamera, iki 21 kadro per sekundę), temperatūros matuoklis „Mastech MS6514“, duomenų registravimui – programa „PicoLog Recorder“.

Visų pirma, rutuliukai ir su alyva besikontaktuojančios įrenginio dalys yra valomos ultragarsinėje vonelėje, nusauginamos ir nuvalomos acetonu. Pirmasis eksperimentinis bandymas buvo atliktas su standartine alyva 5W–20 „X“ gamintojo, įpilta 22 ml mėginio į keturių rutulių mašinos tiriamosios medžiagos indą, kuriame nejudamai yra įtvirtinti trys rutuliai, šio kiekio užtenka, kad jie būtų apsemti. Ketvirtas rutulys įstatomas į mašinos veleną, į kurį prispaudžiami apatiniai rutuliai. Rutuliai prispaudžiami per apkrovos svirtį, kuri yra apkraunama 150N jėga pridirbimui, o po pridirbimo – 300N jėga. Paleidus stendą matuojamas trinties momentas, kuris susidaro tarp rutulių ir yra gaunamas per jėgos jutiklį. Bandomos alyvos temperatūra ir trinties momentas registruojami „PicoLog Recorder“ programine įranga, 1 sekundės dažnumu, išsaugant kompiuteryje. Bandymuose naudotas jėgos jutiklis „Kistler 9341B“, kurio matavimo tikslumas yra $\pm 1 \text{ N}$, o jautrumas – $0,1 \text{ mV/N}$. Tyrimui atlikti mašina buvo nustatyta taip, kad viršutinis rutulys suktųsi 1500 min^{-1} dažniu, dviem režimais, pirmas pridirbimo atveju naudojant 150N jėga, 60 min., pridirbimas reikalingas, kad užtikrintų optimalų sąlyčio paviršių adaptaciją, sumažintų pradines nelygumų sąveikas ir būtų pasiekti stabilūs trinties bei dilimo režimai. Po pridirbimo parenkama 300 N jėga ir mašinos darbo režimas cikliškas, t.y. mašina veikia cikliškai, jos vienas

ciklas trunka 80 s, iš kurių mašina sukasi 60 s ir daro pauzę 20 s. Toks darbo režimas buvo parinktas dėl pritaikomumo šiuolaikiniams automobiliams, kurie turi „start/stop“ režimus ir hibridiniams varikliams. Mašina buvo nustatyta taip, kad atliktų iki 1000 ciklų, kas yra bendrai paėmus, be pridirbimo 80000 s ~ 22 val. Atlikus vieną tokį bandymą yra gaunami duomenys į kompiuterį, užregistruojami trinties momentai ir temperatūra, kuri svyruoja nuo 20 °C iki 40 °C. Taip pat gaunami nudilimų pėdsakai rutuliukuose, kurie nusausinami, nuvalomi ir išmatuojami optiniu mikroskopu, o siekiant tiksliau įvertinti paviršių nudilimą, atliekama paviršių vaizdų fiksacija naudojant mikroskopo kamerą. Analogiškai bandymas atliekamas su modifikuota alyva, tik prieš tai reikia paruošti nanostruktūrizuotą alyvą. Apskaičiuota, kiek nanodalelių bus dedama, po kiekio santykio skaičiavimo apskaičiuota, kad alyvos masę sudarys ~18,7 g, grafino masę ~0,019 g, bendroje masėje gaunasi (alyva + grafinas) ~18,72 g. Tai reiškia, kad į 22 ml alyvos reikėtų įmaišyti 0,019 g grafino, kad gautųsi 0,1 proc. koncentracija. Viską apskaičiavus ir pasvėrus svarstyklėmis, mėginys maišomas magnetine maišykle 60 min., po kurių sudedama į keturių rutulių stendą ir paleidžiama. Iš viso buvo atlikti du eksperimentiniai bandymai su trim pakartojimais. Analizuojant gautus duomenis buvo nustatomos alyvų ilgalaikės tribologinės savybės: stabilumas, veiksmingumas ekstremaliomis sąlygomis, trinties koeficientai ir dilimo dydžiai.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

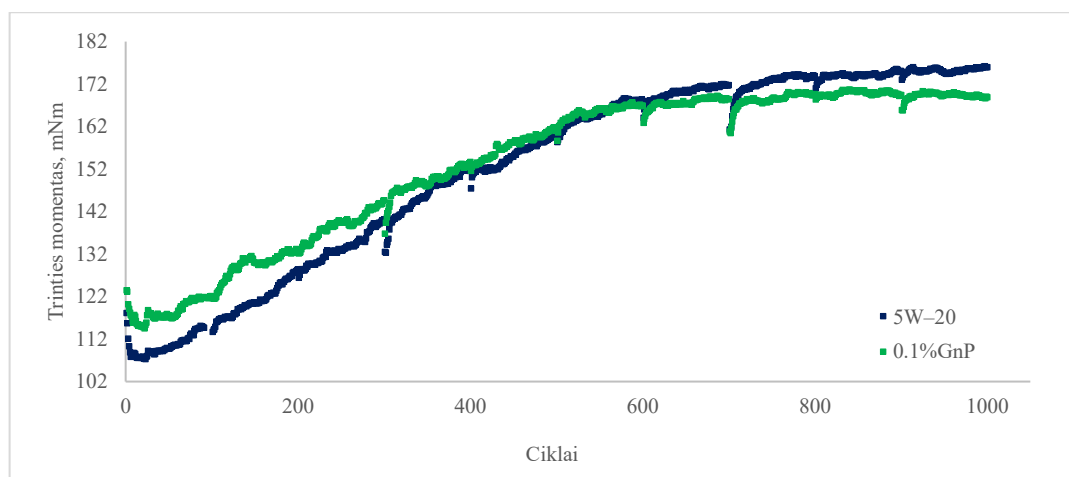
Atlikus tyrimus ir apdorojus gautus duomenis, visų pirma buvo analizuojama trinties momento priklausomybė nuo ciklų skaičiaus, tiek su bazine 5W–20 alyva „X“ gamintojo, tiek su modifikuota alyva grafino nanodalelėmis (GnP). Eksperimentiniai rezultatai, vaizduojantys sukimo momento pokyčius per visą bandymo trukmę iki 1000 ciklų, yra pateikiami 2 paveiksle.

- Pradiniame etape (0–200 ciklų) abiem atvejais pastebėtas staigus trinties momento padidėjimas, kuris buvo susijęs su paviršiaus prisitaikymo procesu. Modifikuotos alyvos pradinis sukimo momentas buvo šiek tiek didesnis nei bazinės alyvos, o tai gali reikšti, kad dėl pradinės nanodalelių sąveikos su trinties paviršiais reikalavo papildomo paviršių prisidirbimo.

- Viduriniame etape (200–700 ciklų) trinties momentas nuolat didėjo, tačiau modifikuotos alyvos trinties momentas buvo mažesnis, lyginant su standartine alyva, o tai rodo, kad ryškėja grafino veiksmingumas, gerėja tepimo savybės ir yra išlaikomas mažesnis metalo kontaktas. Šią tendenciją galima sieti su dėl susiformavusios apsauginės nanodalelių dangos ant kontaktinių paviršių, kuri sumažino sukibimo ir deformacijos poveikį trinties zonoje.

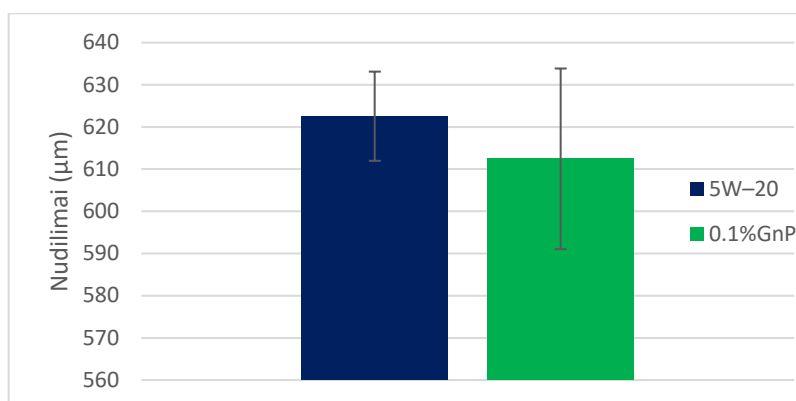
- Paskutiniame etape (700–1000 ciklų) sukimo momentas su modifikuota alyva išliko šiek tiek mažesnis nei su bazine alyva. Tai patvirtina, kad ilgai grafino nanodalelės padeda užtikrinti stabilesnį tepimą ir mažina alyvos degradaciją. Lyginant galutines vertes, standartinės alyvos trinties momentas siekė ~172 mNm, o patobulintos alyvos trinties momentas pasiekė apie 5 proc. mažesnes vertes, o tai gali būti reikšmingas rodiklis ilgalaikiam variklio tepimui.

Taip pat nustatyta, kad modifikuota alyva pasižymi mažesniais trinties momento svyravimais, stabilesniu tepimu veikiant ciklinėms apkrovoms. Toks poveikis gali būti ypač aktualus „start–stop“ sistemoms ir hibridiniams varikliams, kur reikia stabilų alyvos savybių esant dinaminėms apkrovoms.



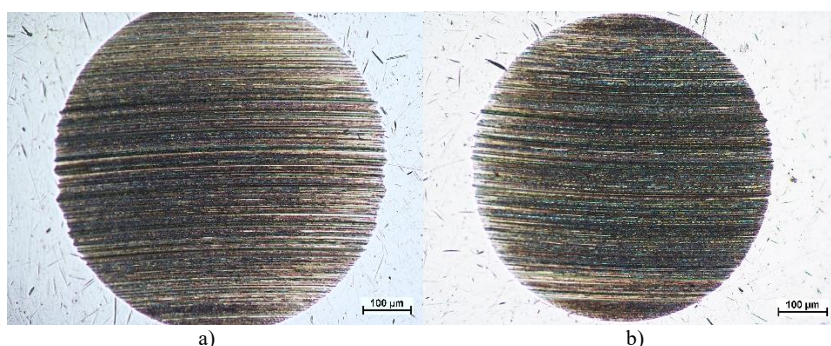
2 pav. Trinties momento priklausomybė nuo ciklų skaičiaus, alyvos 5W–20 ir 0,1 % modifikuotos (GnP) grafino nanodalelėmis
Fig. 2. Friction torque vs. number of cycles for 5W–20 oil and 0.1% modified (GnP) graphene nanoparticles

Optiniu mikroskopu įvertinus rutulių dilimo pėdsakus, buvo išmatuoti vidutiniai dilimo dydžiai po 1000 ciklų (žr. 3 pav.). Gauti rezultatai parodė, kad naudojant modifikuotą alyvą (GnP), nudilimo dydžiai buvo mažesni nei naudojant bazinę alyvą. Vidutinė 5W–20 alyvos nudilimo reikšmė buvo 622,55 μm, o modifikuotos – 612,45 μm. Tai rodo, kad grafino nanodalelės sumažino metalo kontaktinį nusidėvėjimą, suteikiant geresnį tepimą ir apsaugą nuo paviršiaus pažeidimų. Nors skirtumas tarp vidutinių nudilimų ~10 μm, dilimas buvo sumažintas, taip pat paklaidos juostos rodo nežymią duomenų sklaidą, tačiau jos ribose abiejų alyvų nudilimo reikšmės persidengia, o tai rodo nedidelį, bet teigiamą poveikį.



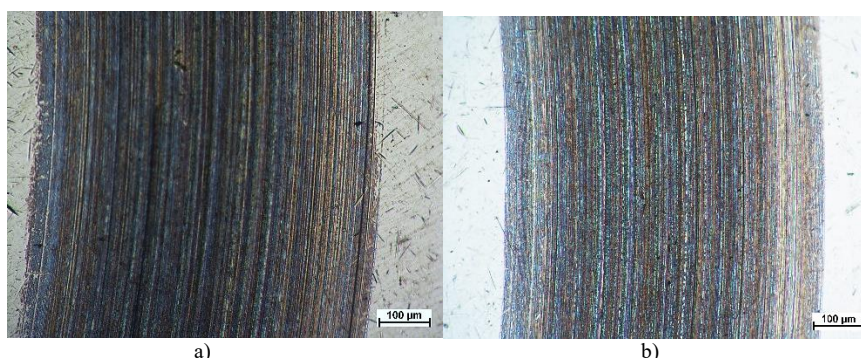
3 pav. Rutulių nudilimo pėdsakų vidutinio skersmens reikšmės, alyvos 5W–20 ir 0,1 % modifikuotos (GnP) grafeno nanodalelėmis
Fig. 3. Average diameter values of the wear traces of the balls, 5W–20 oil and 0.1% modified (GnP) graphene nanoparticles

Po bandymų, optiniu mikroskopu buvo atlikta rutulių paviršių vaizdų fiksacija (žr. 4 ir 5 pav.), po 1000 ciklų, tiek naudojant 5W–20 alyvą, tiek 0,1 proc. (GnP) modifikuotą alyvą. Modifikuotos alyvos atveju paviršius buvo lygesnis, turėjo mažiau mechaninių pažeidimų. Paviršiaus struktūros analizė rodo, kad naudojant standartinę alyvą (kairėje) dilimo žymės yra ryškesnės ir gilesnės, o tai rodo didesnę adheziją ir abrazyvinį / mechaninį dilimą. Modifikuotos alyvos atveju (dešinėje) paviršiaus struktūra atrodo lygesnė, o dilimo žymės yra mažiau ryškios ir tolygios, o tai rodo mažesnę paviršiaus pažeidimą dėl trinties. Šie rezultatai patvirtina, kad alyva su grafeno nanodalelėmis mažina dilimą, sudarydamos apsauginį tribologinį sluoksnį tarp kontaktuojančių metalinių paviršių. Dėl šio poveikio pailgėja detalių tarnavimo laikas ir alyvos tepimo savybių stabilumas, ypač ilgalaikio naudojimo metu.



4 pav. Nudilusius pėdsakų vaizdai įtvirtintuose nejudamai rutuliukuose: a) 5W–20 alyvos; b) 0,1 % modifikuotos (GnP) grafeno nanodalelėmis

Fig. 4. Images of worn traces in embedded fixed balls: a) 5W–20 oil; b) 0.1% modified (GnP) graphene nanoparticles

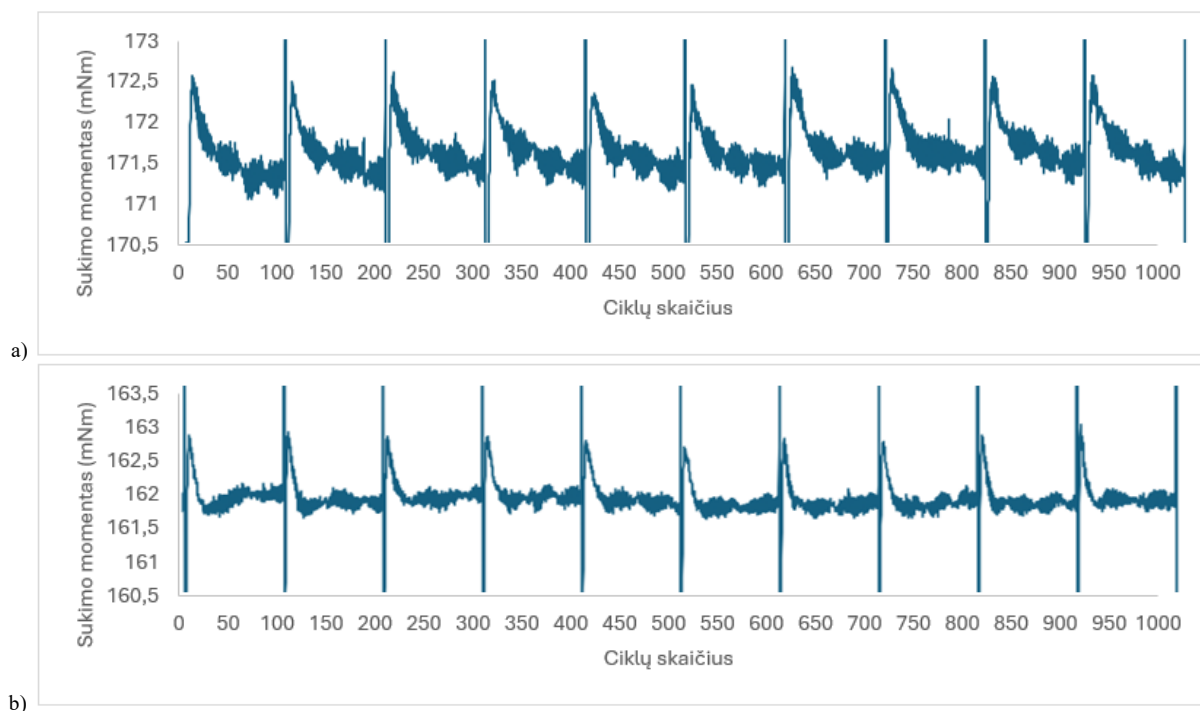


5 pav. Nudilusius pėdsakų vaizdai įtvirtintame velene besisukančio rutuliuko: a) 5W–20 alyvos; b) 0,1 % modifikuotos (GnP) grafeno nanodalelėmis

Fig. 5. Images of worn traces on a ball rotating in an embedded shaft: a) 5W–20 oil; b) 0.1% modified (GnP) graphene nanoparticles

Norint įvertinti trinties koeficiento tolygumą ilgalaikiame režime, buvo analizuojami trinties momento svyravimai per visą bandymo laikotarpį (žr. 6 pav.). Rezultatai parodė, kad standartinės 5W–20 alyvos trinties koeficiento svyravimai buvo dideli, ypač bandymo pabaigoje, o tai rodo prastesnę alyvos tepimo efektyvumą ir didesnę degradacijos poveikį. Tuo tarpu (GnP) grafeno nanodalelėmis modifikuotos alyvos trinties momento svyravimai buvo mažesni, o trinties pikas po kiekvieno ciklo nusistovėjo greičiau, o tai rodo stabilesnį tepimo efektą ir geresnį prisitaikymą prie dinamiškų apkrovų. Standartinės alyvos atveju taip pat pastebėti ryškesni momentiniai šuoliai tarp ciklų, o tai gali reikšti mažiau efektyvų tepimo procesą ir didesnes kontaktinių paviršių apkrovas. Šie rezultatai leidžia teigti, kad grafeno nanodalelėmis papildyta

alyva sumažina paviršių kontaktą, užtikrina stabilesnį trinties procesą ir gali padėti sumažinti mechaninių komponentų nusidėvėjimą ilgalaikėje perspektyvoje, o tai ypač aktualu esant dinamiškai apkrovai, pavyzdžiui, „start/stop“ sistemose ar hibridiniuose varikliuose.



6 pav. Trinties momento stabilumo grafikai per visą bandymo laikotarpį: a) 5W–20 alyvos; b) 0,1 % modifikuotos (GnP) grafeno nanodalelėmis

Fig. 6. Friction moment stability plots over the entire test period: a) 5W–20 oil; b) 0.1% modified (GnP) graphene nanoparticles

Išvados

1. Literatūros analizė parodė, kad grafeno nanodalelės yra perspektyvūs tribologiniai priedai, galintys pagerinti variklinių alyvų tepimo savybes ir sumažinti trintį bei mechaninį dilimą. Ilgalaikių tyrimų šioje srityje vis dar trūksta, todėl šis tyrimas prisideda prie žinių gilinimo. Alyva su grafeno nanodalelėmis pasižymėjo geresnėmis tribologinėmis savybėmis, palyginti su standartine 5W–20 alyva. Nors skirtumas nebuvo didelis, pastebėta, kad grafenas suformavo apsauginį sluoksnį, kuris sumažino paviršiaus dilimą ir trintį ilgalaikėje eksploatacijoje.

2. Eksperimentinio tyrimo metodika sudaryta naudojant keturių rutulių mašiną pagal DIN 51350 standartą, leidžiančią objektyviai įvertinti alyvų tribologines savybes. Sintetinė alyva 5W–20 buvo modifikuota grafeno nanodalelėmis ir išbandyta ilgalaikiais ciklinės apkrovos bandymais. Trinties momento stabilumas parodė, kad modifikuota alyva užtikrina tolygesnį tepimą ir sumažina momentinius trinties svyravimus. Tai ypač svarbu šiuolaikiniams varikliams, veikiančiais ciklinėmis apkrovomis, pavyzdžiui, „start/stop“ režime.

3. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad alyva su grafeno nanodalelėmis, palyginti su standartine alyva, sumažino trinties momentą ir vidutinį dilimo greitį. Vidutinis dilimo pėdsako skersmuo, naudojant modifikuotą alyvą, buvo apie 10 μm mažesnis nei naudojant standartinę alyvą. Nors šis skirtumas nėra didelis, tai patvirtina, kad grafenas formuoja apsauginį tribologinį sluoksnį ir prisideda prie stabilesnio tepimo proceso. Dilimo pėdsakų analizė parodė, kad modifikuota alyva sumažino dilimo intensyvumą, tačiau skirtumas tarp standartinės ir praturtintos alyvos nebuvo labai reikšmingas. Tai rodo, kad mažos grafeno koncentracijos poveikis yra teigiamas, tačiau siekiant didesnio efektyvumo, gali būti tikslinga optimizuoti nanodalelių pasiskirstymą arba koncentraciją.

4. Trinties momento stabilumo analizė rodo, kad modifikuota alyva sumažina momentinius trinties šuolius tarp ciklų ir užtikrina tolygesnį tepimo režimą. Tai ypač aktualu šiuolaikiniams varikliams su „start/stop“ sistemomis, kuriems reikalinga efektyvi tepimo stabilizacija. Eksperimentų rezultatai patvirtina, kad ilgalaikiai alyvų tyrimai leidžia nustatyti jų tribologinius savybių pokyčius ciklinių apkrovų metu, o šie pokyčiai gali būti svarbūs praktiniam pritaikymui.

Literatūra

1. Ali, Z. A. A. A., Takhakh, A. M., & Al-Waily, M. (2022). A review of use of nanoparticle additives in lubricants to improve its tribological properties. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1442-1450 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.193>.
2. Alqahtani, B., Hoziefa, W., Abdel Moneam, H. M., Hamoud, M., Salunkhe, S., Elshalakany, A. B., ... & Davim, J. P. (2022). Tribological performance and rheological properties of engine oil with graphene nano-additives. *Lubricants*, 10(7), 137. <https://doi.org/10.3390/lubricants10070137>.

3. Asrul, M., Zulkifli, N. W. M., Masjuki, H. H., & Kalam, M. A. (2013). Tribological properties and lubricant mechanism of nanoparticle in engine oil. *Procedia Engineering*, 68, 320-325. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.186>
4. Berman, D., Erdemir, A., & Sumant, A. V. (2014). Graphene: a new emerging lubricant. *Materials today*, 17(1), 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.12.003>.
5. Birleanu, C., Pustan, M., Cioaza, M., Molea, A., Popa, F., & Contiu, G. (2022). Effect of TiO₂ nanoparticles on the tribological properties of lubricating oil: an experimental investigation. *Scientific reports*, 12(1), 5201 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09245-2>.
6. Dong, Y., Ma, B., Xiong, C., Liu, Y., & Zhao, Q. (2023). Study on the Lubricating Characteristics of Graphene Lubricants. *Lubricants*, 11(12), 506. <https://doi.org/10.3390/lubricants11120506>.
7. Liu, Y., Yu, S., Shi, Q., Ge, X., & Wang, W. (2022). Graphene-family lubricant additives: recent developments and future perspectives. *Lubricants*, 10(9), 215 <https://doi.org/10.3390/lubricants10090215>
8. Marlinda, A. R., Thien, G. S. H., Shahid, M., Ling, T. Y., Hashem, A., Chan, K. Y., & Johan, M. R. (2023). Graphene as a lubricant additive for reducing friction and wear in its liquid-based form. *Lubricants*, 11(1), 29. <https://doi.org/10.3390/lubricants11010029>. (žiūrėta 2025-02-13).
9. Nagarajan, T., Sridewi, N., Walvekar, R., Khalid, M. (2023). Enhanced tribological properties of diesel-based engine oil through synergistic MoS₂-graphene nanohybrid additive. *Scientific Reports*. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43260-1>.
10. Thampi, A. D., Prasanth, M. A., Anandu, A. P., Sneha, E., Sasidharan, B., & Rani, S. (2021). The effect of nanoparticle additives on the tribological properties of various lubricating oils–Review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4919-4924. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.664>
11. Garcia Tobar, M., Contreras Urgiles, R. W., Jimenez Cordero, B., & Guillen Matute, J. (2024). Nanotechnology in lubricants: A systematic review of the use of nanoparticles to reduce the friction coefficient. *Lubricants*, 12(5), 166. <https://doi.org/10.3390/lubricants12050166>

LONG-TERM TRIBOLOGICAL PERFORMANCE STUDY OF GRAPHENE NANOPARTICLE MODIFIED 5W–20 OIL

Abstract

The tribological properties of engine oils are crucial for ensuring the efficient operation and longevity of mechanical systems. In recent years, considerable attention has been paid to oils modified with nanoparticles, which have shown potential in enhancing lubrication, reducing friction, and minimizing wear. Among these additives, graphene nanoparticles stand out due to their exceptional mechanical strength, chemical inertness, and high thermal conductivity, making them one of the most promising tribological enhancers. However, most existing studies focus on short-term performance, while long-term experimental data remain scarce. This study investigates a 5W–20 fully synthetic engine oil modified with graphene nanoparticles, tested using a four-ball tribometer. The experiments were conducted at a rotational speed of 1500 rpm, applying a cyclic load pattern of 100 cycles with 20-second pauses, continuing up to 1000 cycles. The friction torque was recorded throughout the test, and wear scar diameters were evaluated using optical microscopy. The findings demonstrate that graphene nanoparticle-enriched oil significantly reduced the friction coefficient and average wear scar diameter compared to the standard 5W–20 oil. These results indicate that long-term tribological testing of graphene-modified oils can provide valuable insights into their performance stability under extreme conditions. Such findings may contribute to the advancement of engine oil formulations and the optimisation of their use in both automotive and industrial applications.

Keywords: nanoparticle modified oil, 5W–20, graphene, coefficient of friction, wear, friction torque, four-ball machine.