

UTTO ALYVOS TEPAMŲJŲ SAVYBIŲ GERINIMO MODIFIKUOJANT NANODALELĖMIS ANALIZĖ

Irmantas BUTKA, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: irmantas.butka@vdu.lt

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

Santrauka

Vyraujant didelei apkrovai ir kintančiai darbo temperatūrai, svarbu išlaikyti alyvų tribologines savybes, kaip tepimo gerinimo ar hidraulinių mechanizmų tarnavimo resursą. Alyvų modifikavimas nanodalelėmis, kaip grafenu, sumažina trintį ir dilimą, nes grafeno nanodalelės pasižymi atsparumu deformacijai, dilimui ir gerai užpildo mikronelygumus. Daugumoje tyrimų nagrinėjama skirtingo kiekio ir įvairių nanodalelių taikymas, bet nėra plačiai atkreipiamas dėmesys į darbo temperatūrų ir skirtingų apkrovų taikymą darbo metu. Keturių rutulių mašinos eksperimentiniuose tyrimuose tirta grafeno nanodalelių įtaka hidraulinės alyvos tribologinėms charakteristikoms. Šiame darbe buvo atliekami trinties ir dilimo bandymai taikant 300 N apkrovą bei pradinių temperatūrų 40 °C, 60 °C, 80 °C sąlygomis, registruojant trinties momentus ir nustatant nusidėvėjimo pėdsakų skersmenis. Rezultatai parodė, kad nanodalelėmis modifikuota alyva pasižymi mažesniu trinties momentu ir mažesniu dilimo intensyvumu, lyginant su nemodifikuota alyva, o efektas priklauso nuo dalelių koncentracijos ir apkrovos. Nustatyta, kad nanodalelės formuoja apsauginę triboplėvelę ir mažina tiesioginį paviršių kontaktą, todėl gerėja mišraus ir ribinio tepimo sąlygos. Daroma išvada, kad tinkamai parinktos nanodalelės yra perspektyvus sprendimas hidraulinių sistemų patikimumui ir ilgaamžiškumui didinti.

Reikšminiai žodžiai: nanodalelės, grafenas, dilimo pėdsako skersmuo, dilimas.

Įvadas

Hidraulinės sistemos yra vienos svarbiausių šiuolaikinės žemės ūkio technikos sistemų. Hidraulinės sistemos plačiai naudojamos žemės ūkio, pramonės, statybos sektoriuose. Hidraulinės alyvos yra vienas iš svarbiausių hidraulinės sistemos elementų, be kurio nebūtų atliekamas darbas. Hidraulinės sistemos darbas pagrįstas skysčio slėgio energijos perdavimu, kuris leidžia valdyti dideles apkrovas ir suteikti stabilų mechanizmų judėjimą (Haragāš et al., 2020). Hidraulinių sistemų patikimumas priklauso nuo daug veiksnių, kaip, pavyzdžiui, laiku atliekamų aptarnavimų, tinkamai parinktos alyvos ir sistemos sandarumo, nes alyva ne vien atlieka energijos perdavimą, bet ir tepimo funkciją, aušinimo bei apsaugos nuo korozijos funkciją (Pabsetti et al., 2023). Tinkamai prižiūrint sistemą bus išvengta alyvos struktūros pakitimų, kaip priedų ar alyvos struktūrų įrimo ir darbai bus atliekami produktyviai.

Didėjant technikos galingumui, darbo apkrovoms ir greičiams, hidraulinėms sistemoms keliami vis griežtesni reikalavimai, hidraulinių sistemų agregatai gaminami kompaktiškesni ir efektyvesni. Sumažinus hidraulinius mechanizmus, tuo pačiu didinami sistemų slėgiai, todėl kontaktinių darbo paviršių apkrovos tampa didesnės, kyla alyvos temperatūra, atsiranda spartesnis mechanizmų dilimas ar atsiranda alyvos nestabilumas, kaip cheminių ir fizinių savybių praradimas (Ealia et al., 2017). Todėl vien tik bazinės alyvos savybių nebepakanka, hidraulinės sistemos būklė priklauso nuo alyvoje esančių priedų įvairovės. Alyvų tepamosioms savybėms gerinti naudojamos nanodalelės. Nanodalelės tai labai mažos dalelės, pasižyminčios išskirtinėmis savybėmis, kaip chemine struktūra, paviršiaus plotu ar suteikiama nauda alyvai (Ali et al., 2022). Grafenas dėl savo gebėjimo formuoti apsauginę triboplėvelę ant kontaktuojančių paviršių užpildo mikronelygumus, pasižymi mechaniniu stiprumu, imituojamoms sudėtingoms darbo sąlygoms. Grafeno nanodalelės gali pagerinti, mažinti sąveikaujančių kūnų trintį, kad alyva būtų patikimesnė esant ekstremalioms darbo sąlygoms.

Taigi, tyrinėjant hidraulinių alyvų tepamųjų savybių gerinimą modifikuojant nanodalelėmis, siekiama įvertinti grafeno nanodalelių naudą sąveikaujantiems paviršiams, pagerinti veiksmingumą ir padidinti hidraulinių sistemų ilgaamžiškumą bei veikimo patikimumą šiuolaikiniuose agregatuose.

Tyrimo tikslas – nustatyti grafeno nanodalelių įtaka hidraulinei alyvai, veikiant didelei apkrovai ir skirtingai pradinei darbo temperatūrai, analizuojant nudilimo dėmes ir trinties momentus.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Atlikti literatūros šaltinių analizę.
2. Parengti eksperimentinių tyrimų metodiką.
3. Ištirti modifikuotų ir nemodifikuotų alyvų tribologines savybes esant skirtingoms temperatūroms.
4. Išnagrinėti gautus rezultatus ir aprašyti išvadas.

Tyrimų objektas ir metodai

Šiems eksperimentiniams tyrimams buvo pasirinkta transmisinė–hidraulinė alyva „UTTO“. Nors ši alyva naudojama ne vien bendrai hidraulinei–transmisinei sistemai, bet dažnu atveju ši alyva naudojama tik hidraulinei sistemai.

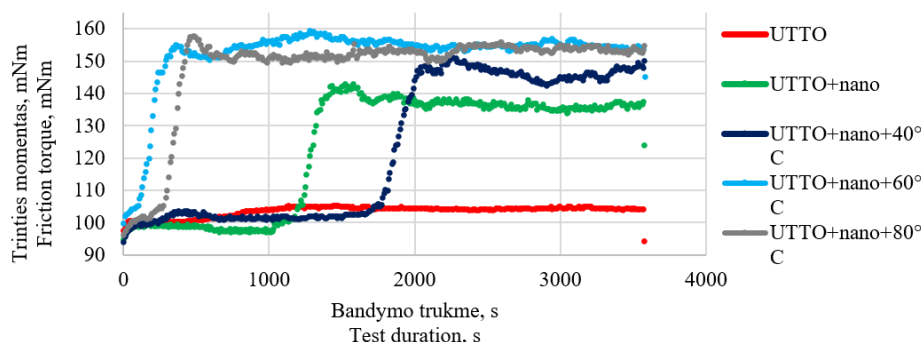
Šios alyvos pasirinkimą lėmė tai, kad ši alyva yra plačiai naudojama žemės ūkio ir statybos technikoje, kaip universali hidraulinė–transmisinė alyva. Šiuo atveju ši alyva tirinama kaip hidraulinė alyva. Ekskavatoriai ar traktoriai dirba be sustojimo ilgą laiką ir alyvos temperatūra išlieka aukšta viso darbo metu. Tačiau ekskavatorius užgesinamas patikrinti išorinių mazgų ar atlikti kitų darbų. Per neilgą pertrauką alyva nespėja atvėsti iki aplinkos temperatūros, alyvos temperatūra išlieka gana aukšta. Todėl yra atkreipiamas dėmesys į alyvos tribologinių savybių kitimą skirtinguose temperatūrų momentuose. Hidraulinės alyvos modifikavimui pasirinktos grafeno nanodalelės. Remiantis literatūros šaltiniais, grafeno nanodalelės plačiai naudojamos visose alyvose. Grafenas sumažina trintį, sukuria apsauginį tribosluoksnį darbo paviršiams, tokiu atveju yra sumažinamas dilimo intensyvumas kritinėmis darbo sąlygomis. Grafenas pagamintas Amerikiečių kompanijos SIGMA-ALDRICH. Bandymams buvo pasirinkta 0,1% koncentracijos pagal masę nanodalelių, dalelių dydis apie 5 μm , susidedančios iš trumpų grafeno lakštų, grynos grafitinės sudėties, miltelių pavidalo ir maišomos su UTTO hidrauline alyva. Šiame tyrime eksperimentams atlikti buvo pasirinkta modernizuota keturių rutulių trinties mašina MAST-1 (MACT-1) – pagrindinis prietaisas atliekant tribologinius trinties bandymus. Mėginiams, 12,7 mm guolių plieno rutuliams paruošti – nuriebalinti ir nuvalyti naudota ultragarsinė vonelė „Bandelin sonorex digitec“. Visi bandymai atlikti su 300 N apkrova.

Atliekamiems svėrimams pasirinktos precizinės svarstyklės „Sartorius Entris 124I-1S“, svarstyklių paklaida $\pm 0,1\text{mg}$. Į alyvą įpilama nanodalelių ir visas mėginys buvo išmaišomas mentele, paskleidžiant vienodžiau nanodaleles alyvoje. Mėginiai buvo ruošiami mažomis dozėmis, kad būtų išlaikytas jų šviežumas ir būtų lengvesnis mažo kiekio pakartotinis išmaišymas. Pirmas mėginio maišymas vyko į 52,7 g alyvos su 0,0517 g nanodalelių arba antru maišymu į 33,51 g alyvos įmaišyta 0,0377 g nanodalelių. Tokie sumaišymai vyko prieš kiekvieną tribologinį eksperimentą. Tada į mėgintuvėlį įdedamas dispersinis maišytuvas „IKA T25 digital ultra turrax“. Visas mėginys maišomas 5 min 7000 min^{-1} sukimosi dažniu. Po sumaišymo paruošti mėginiai prieš įpilant į keturių rutuliukų mašinos bandymo kamerą dar pakartotinai išmaišomi, nes grafeno nanodalelės turi savybę nusėsti.

Tyrimai visų pirma prasidėjo nuo standartinės alyvos eksperimentų, be grafeno. Tada bandymai buvo atliekami su modifikuota grafeno nanodalelėmis alyva. Atlikus testus su standartine ir modifikuota alyva ir nustatyta nuolatinė apkrova 300 N, pradėti tokie patys testai tik keičiant visų bandymų pradinę darbo temperatūrą 40 °C, 60 °C, 80 °C. Visi bandymai buvo atliekami pagal standartinę metodiką ir pakartojami po tris kartus. Eksperimento trukmė – 1 valanda, trinties momento (mNm), temperatūros kitimai fiksuojami kas 1 sekundę, duomenų registravimui naudota programa „PicoLog Recorder“ – šia programa įrašomas trinties momentas, alyvos ir aplinkos temperatūra. Likę duomenys, kaip kontakto paviršiaus nudilimo pėdsako skersmuo (μm) buvo fiksuojami mikroskopu „Nikon Eclipse MA 100“.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Šių bandymų tikslas buvo ištirti grafeno nanodalelių poveikį metaliniams paviršiams esant didelei apkrovai, kuri imituotų sunkų realios hidraulinės sistemos darbą. Veikiant 300 N apkrovai, nanodalelės ir skirtingai pradinėi temperatūrai, duomenys buvo gaunami labai skirtingi lyginant su standartine nemodifikuota UTTO transmisine–hidrauline alyva. 1 paveiksle pateikti bandymai su 300 N apkrova ir nanodalelėmis, dėl palyginimo buvo įterpta kreivė su nemodifikuota alyva. Standartinė alyva tyrimų metu neparodė žymių trinties momento pokyčių, visą tyrimo laikotarpį išliko tolygus iki 105 mNm. Bandymai su nanodalelėmis buvo labai skirtingi, nes įvairiais darbo momentais alyvos trinties momentai staigiai pakilo. Taip galėjo būti dėl to, kad veikiant didelei apkrovai, grafeno nanodalelės, patekusios ant kontakto paviršiaus, buvo susmulkinamos ir mėginiai galėjo pasidengti ne vien alyvos triboplėvelė, bet ir grafenu, dėl to susidaro abrazyvinis dilimas.



1 pav. Bandymai su standartine UTTO alyva ir modifikuota nanodalelėmis

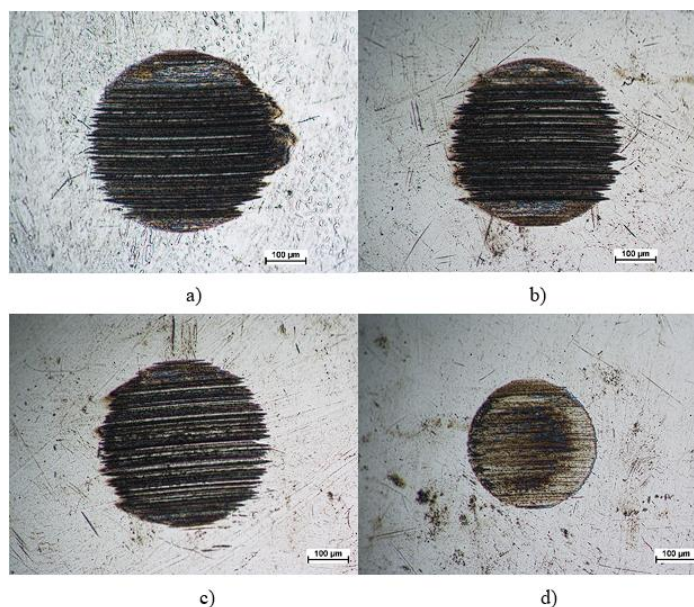
Figure 1. Tests with standard UTTO oil and nanoparticle-modified oil.

Šio proceso metu kilo didesnis paviršiaus pasipriešinimas ir padidėjo trinties momentas. Skirtingiems eksperimentams staigus trinties momentas padidėjo įvairiais laiko momentais nuo bandymo pradžios. Alyva su grafeno nanodalelėmis ir esant pradinėi 60 °C temperatūrai, trinties momentas turėjo staigų padidėjimą. Nuo 99 iki 158 mNm kitimas buvo labai staigus, ir visą bandymo laikotarpį išliko su besikeičiančiu, bet gana tolygiu trinties momentu, o esant 80 °C, trinties momentas kito nuo 102 iki 150 mNm.

Grafeno nanodalelių įtaka taip pat matoma kreivėse su pradine 40 °C temperatūra ir tiesiog modifikavus alyvą su nanodalelėmis. Šių trinties porų trinties momento kitimas įvyko vėliau – jau 1000–2000 s. Visi staigūs trinties momentų

padidėjimai galėjo reikšti grafeno nanodalelių aglomeraciją ar sumažėjusią alyvos klampą dėl nanodalelių. Visų grafikų staigius trinties momentų kitimus, kontaktą veikianti 300 N apkrova sukuria darbo paviršiams mišraus ar net ribinio tepimo sąlygas, tuo pačiu sumažėja alyvos klampa, tai reiškia, kad ekstremaliomis darbo sąlygomis alyva kontaktuoja su metaliniais paviršiais.

Tepamosios medžiagos įtaka vidutiniam rutulių nudilimo dėmės skersmeniui pateikta 3 paveikslė. Šiuose grafikuose naudoti UTTO alyvos bandymų gauti rezultatai, kaip atskaitos taškas. Nemodifikuotos alyvos (žr. 2 pav. a) rutuliukų nudilimo skersmuo buvo 0,48 mm. Tai lyginant su UTTO + grafenas su nano dalelėmis 0,1 % (žr. 2 pav. b) buvo išgautas mažesnis nudilimo skersmuo iki 11,77 %. Veikiant apkrovai išvelgiamas aukštas grafeno nanodalelių naudingumas, paviršiaus apsaugos aspekto. Didelė apkrova apsunkina triboplėvelės susidarymą, sukuria ribinio tepimo sąlygas, kurios priverčia darbo pradžioje intensyviau vykti paviršiaus mikronelygumų dilimui. Iš fotografijų tai matyti, kad naudojant nanodaleles dilimo paviršiuje susidaro mažiau gilesnių įbrėžimų.

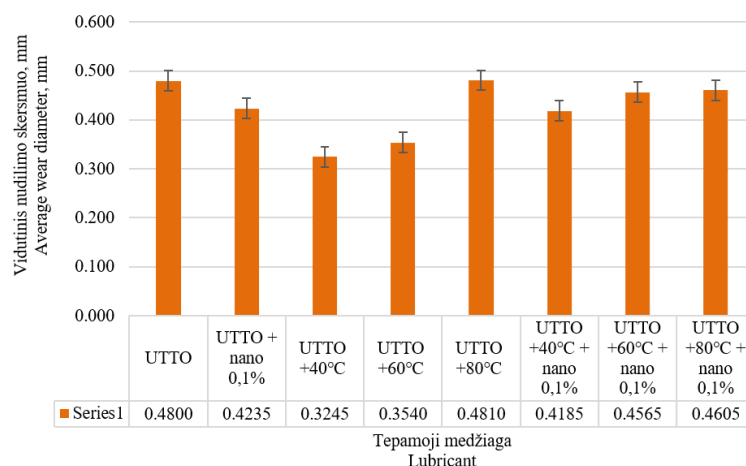


2 pav. Rutuliukų nudilimo pėdsakų, dirbusių esant 300 N apkrovai, vaizdai: a) UTTO + 20 °C; b) UTTO + grafenas su nano dalelėmis 0,1 %; c) UTTO + 40 °C + grafenas su nano dalelėmis 0,1 %; d) UTTO + 40 °C.

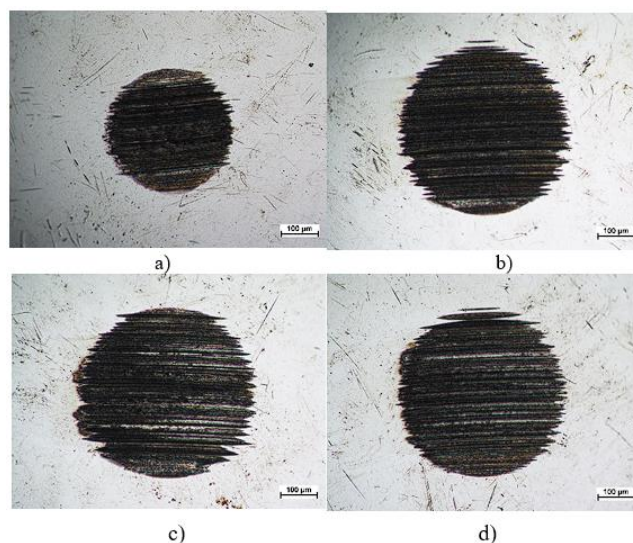
Figure 2. Images of wear scars on the balls after testing under a 300 N load: a) UTTO (+20 °C); b) UTTO + graphene with 0.1% nanoparticles; c) UTTO + 40°C + graphene with 0.1% nanoparticles; d) UTTO + 40°C.

Didžiausias pagerėjimas gautas su UTTO + 40 °C (žr. 2 pav. d), nudilimas sumažėjo 32,4 %. Šią alyvą sušildžius iki optimalios temperatūros, kaip 40 °C ir veikiant didelei apkrovai, geriausiai suformuoja apsauginį alyvos sluoksnį, lyginant su visais tyrimais, bet ši alyva dirba darbo mechanizmuose prie aukštesnių temperatūrų. Tai reiškia, kažkurį laiką, net ir be papildomai įdėtų priedų alyvoje, alyva išlaikys reikalingas tribologines savybes. Yra pastebimas skirtumas jau pakilus temperatūrai iki 60 °C bandyme UTTO + 60 °C (žr. 3 pav.) nudilimo plotas sumažėjo 26,25 %. Mechanizmas dirba dar rodydamas teigiamą rezultatą, bet kylanti temperatūra parodo, kad tepimo režimai palengva pradeda keistis iš mišraus į ribinį, taip pat iš nudilimo dėmių matyti, kad atsiranda gilesnių paviršiaus pažeidimų. Tyrimas su UTTO + 80 °C (žr. 4 pav. c) parodo, koks yra nedidelis temperatūrų intervalas, jog žymiai pasikeistų apsauginė alyvos plėvelė. Nors ir šio kontaktuojančių paviršių nudilimo plotas padidėjo labai mažai – 0,21 %, tačiau galima teigti, kad alyvos lipnumas ant mikronelygumų, klampa yra labai svarbu.

Modifikuojant alyvą grafeno nanodalelėmis ir pašildant iki 40 °C (žr. 2 pav. c), nudilimo skersmuo sumažėjo 12,8 %. Padidinus alyvos pradinę temperatūrą iki 60 °C, nudilimo skersmuo nežymiai sumažėjo, tik 4,9 %, o pašildžius alyvą iki 80 °C temperatūros nudilimas sumažėjo iki 4,06 %. Grafenas vyraujant didelei apkrovai ir mažėjančiai klampai kompensuoja ribinį kontaktą tarp darbo paviršių, užpildo mikronelygumus (Ali et al., 2022). Prie 80 °C (žr. 4 pav. c) nudilimo skersmuo, kad ir sumažėjo nuo standartinės alyvos, bet bandymo metu alyva buvo pasiekusi net virš 100 °C. Nudilimo plotas vyraujant aukštomis temperatūroms pradėtų didėti, nes mažėja alyvos klampa ir alyva su grafeno nanodalelėmis sunkiau įsitvirtina ant mikropaviršių.



3 pav. Tepamosios medžiagos ir darbo temperatūros įtaka vidutiniams nudilimų skersmenims
Figure 3. Influence of lubricants and operating temperature on average wear scar diameters.



4 pav. Tepamosios medžiagos ir temperatūros įtaka rutulių nudilimo pėdsakams: a) UTTO + 60 °C; b) UTTO + 60 °C + grafenas su nano dalelėmis 0,1%; c) UTTO + 80 °C d) UTTO + 80 °C + grafenas su nano dalelėmis 0,1 %
Figure 4. The effect of lubricants and temperature on ball wear scars: a) UTTO + 60°C; b) UTTO + 60°C + graphene with 0.1% nanoparticles; c) UTTO + 80°C; d) UTTO + 80°C + graphene with 0.1% nanoparticles

Žinoma tai, kad hidraulinės sistemos alyva gali pasiekti daugiau nei 100 °C temperatūrą, dilimas prie tokios temperatūros bus žymiai intensyvesnis, todėl svarbu tai, kad alyvos aušinimas būtų tinkamas. Be abejo, atsiranda, pavyzdžiui, vietiniai perkaitimai kontaktinėse zonose, bet esantys priedai, tokie kaip grafenas, šią problemą padeda dalinai išspręsti ir kažkurį laiką apsaugoti metalinius paviršius nuo intensyvaus dilimo. Būtina keisti alyvą rekomenduojamais intervalais, nes dirbant didelėmis apkrovomis ir vyraujant aukštomis temperatūroms priedai ilgainiui praranda savo geras savybes ir dingsta paviršių apsauga, nes atlikti tyrimai ir padarytos nudilimo dėmių fotografijos tai įrodo.

Išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą nustatyta, kad nanodalelių, ypač grafeno, naudojimas hidraulinėse alyvose gali pagerinti tribologines savybes – sumažinti trintį, dilimą ir pagerinti tepimo režimą sudėtingomis darbo sąlygomis, jeigu yra tinkamai parenkama nanodalelių koncentracija hidraulinėje alyvoje. Literatūros šaltiniai patvirtina, kad nanodalelės formuoja apsauginę triboplėvelę ir užpildo paviršių mikronelygumus.

2. Parengta eksperimentinių tyrimų metodika leidžia įvertinti grafeno nanodalelių poveikį hidraulinės alyvos tribologinėms savybėms. Tyrimams naudota keturių rutulių trinties mašina, nustatyta pastovi 300 N apkrova ir skirtingos pradinės temperatūros (40 °C, 60 °C ir 80 °C), parodė, kad tinkama alyvos klampa ir grafeno nanodalelės suteikia stabilų trinties momentą eksperimento metu.

3. Eksperimentų rezultatai parodė, kad grafeno nanodalelėmis modifikuota hidraulinė alyva, lyginant su nemodifikuota alyva, sumažina kontaktinių paviršių nudilimo skersmenį. Veikiant 300 N apkrovai nustatytas iki 11,77 % mažesnis nudilimo skersmuo, o optimaliomis temperatūrinėmis sąlygomis dilimo sumažėjimas siekė daugiau kaip 30 %, kas patvirtina teigiamą nanodalelių įtaką paviršių apsaugai.

4. Išanalizavus trinties momentų kitimo grafikus ir nudilimo pėdsakus nustatyta, kad grafeno nanodalelės pagerina tepimo sąlygas, nes sudaro apsauginį sluoksnį tarp kontaktuojančių paviršių ir mažina tiesioginį metalinių

paviršių kontaktą, bet esant didelei apkrovai ir aukštesnėms temperatūroms gali pasireikšti trinties momentų nestabilumas, todėl nanopriedų efektyvumas priklauso nuo apkrovos ir temperatūros.

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.2021.11.416>
2. Ealias, A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 263, No. 3, Article 032019). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>
3. Haragăș, S., Pop, D., Cristea, F., & Buiga, O. (2020). Experimental research regarding the tribological properties of a hydraulic oil. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 724, No. 1, Article 012044). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/724/1/012044>
4. Pabsetti, P., Murty, R. S. V. N., Bhoje, J., Mathew, S., Rahul, K., & Feroskhan, M. (2023). Performance of hydraulic oils and its additives in fluid power system: A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1161, No. 1, Article 012009). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1161/1/012009>

ANALYSIS OF THE IMPROVEMENT OF THE LUBRICATING PROPERTIES OF UTTO OIL THROUGH MODIFICATION WITH NANOPARTICLES

Abstract

Under conditions of high load and fluctuating operating temperatures, it is important to maintain the tribological properties of lubricants, such as improved lubrication and the service life of hydraulic mechanisms. Modifying oils with nanoparticles such as graphene reduces friction and wear, as graphene nanoparticles are resistant to deformation and wear and effectively fill micro-cracks. Most studies examine the application of varying amounts and types of nanoparticles, but little attention is paid to the effects of operating temperatures and different loads during operation. Experimental studies using a four-ball machine investigated the influence of graphene nanoparticles on the tribological characteristics of hydraulic oil. In this study, friction and wear tests were conducted under a 300 N load and at initial temperatures of 40°C, 60°C, and 80°C, recording friction torques and measuring the diameters of wear particles. The results showed that nanoparticle-modified oil exhibits lower friction torque and lower wear intensity compared to unmodified oil, and the effect depends on particle concentration and load. It was found that nanoparticles form a protective tribological film and reduce direct surface contact, thereby improving mixed and boundary lubrication conditions. It is concluded that appropriately selected nanoparticles are a promising solution for increasing the reliability and longevity of hydraulic systems.

Keywords: nanoparticles, graphene, wear scar diameter, abrasion.