

GRAFENO IR JONINIO SKYSČIO ĮTAKA VANDENS PAGRINDU SUDARYTAI TEPAMAJAI MEDŽIAGAI

Gvidas BUTENIS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: gvidas.butenis@vdu.lt

Audrius ŽUNDA, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: audrius.zunda@vdu.lt

Santrauka

Šiame straipsnyje nagrinėjama grafeno ir joninio skysčio priedų įtaka vandens pagrindo terpės tribologinėms savybėms. Vanduo pasirinktas kaip bazinė terpė dėl savo ribotų tepimo savybių, leidžiančių aiškiau įvertinti priedų poveikį. Tyrimo tikslas – nustatyti grafeno skirtingų frakcijų ir koncentracijų, joninio skysčio bei jų kombinacijos įtaką trinties procesams ir paviršių dilimui. Eksperimentai atlikti naudojant keturių rutulių tribometrą, registruojant trinties momentą ir temperatūrą bei analizuojant nusidėvėjimo pėdsakus. Tirta: dejonizuotas vanduo, vanduo su grafenu, su joniniu skysčiu ir su jų kombinacija. Nustatyta, kad grafenas sumažina trintį ir stabilizuoja tepimo režimą, o joninis skystis užtikrina ilgiausią stabilaus tepimo trukmę dėl apsauginės plėvelės susidarymo. Grafeno ir joninio skysčio kombinacija sumažina trinties momentą, tačiau ne visais atvejais užtikrina ilgesnį tepimo stabilumą nei joninis skystis vienas.

Raktiniai žodžiai: grafenas, joniniai skysčiai, tribologija, vandens pagrindo tepamoji terpė, trinties koeficientas, dilimas, nanodalelės, tepimo priedai.

Įvadas

Trintis ir dilimas yra vieni svarbiausių tribologinių reiškinių, turinčių didelę įtaką mechaninių sistemų efektyvumui, patikimumui ir eksploatacijos trukmei. Paviršių sąveikos metu prarandama dalis energijos, didėja komponentų nusidėvėjimas ir trumpėja įrenginių tarnavimo laikas (Nosonovsky, Bhushan, 2010). Skačiuojama, kad tribologiniai nuostoliai sudaro reikšmingą pasaulinio energijos suvartojimo dalį, todėl trinties mažinimas ir paviršių apsauga nuo dilimo yra svarbios inžinerinių tyrimų kryptys (Holmberg, Erdemir, 2017).

Pastaraisiais metais daug dėmesio skiriama aplinkai palankesnių tepimo sistemų kūrimui (Morshed et al., 2021; Rahman et al., 2021). Viena iš galimų alternatyvų tradicinėms alyvoms yra vandens pagrindo tepimo terpės. Vanduo pasižymi geru šilumos laidumu, yra netoksiškas ir lengvai prieinamas, tačiau dėl mažo klampumo negali efektyviai apsaugoti trinties paviršių nuo nusidėvėjimo. Todėl vandens pagrindo sistemose naudojami įvairūs priedai, gerinantys tribologines savybes (Morshed et al., 2021; Rahman et al., 2021).

Vienas iš perspektyviausių tokių priedų yra grafenas – dvimatė anglies nanostruktūra, sudaryta iš vieno atomų sluoksnio, kuriame anglies atomai išsidėstę šešiakampėje gardelėje. Grafenas pasižymi dideliu mechaniniu stiprumu, dideliu paviršiaus plotu ir mažu tarpsluoksniu šlyties pasipriešinimu, todėl gali veikti kaip slydimo sluoksnis tarp paviršių ir sumažinti trintį bei dilimą tribologinėse sistemose (Liu et al., 2022).

Kita svarbi priedų grupė yra joniniai skysčiai. Tai druskos tipo junginiai iš organinių katijonų ir anijonų, pasižymintys mažu garavimo slėgiu, geru terminiu stabilumu ir gebėjimu adsorbuotis ant metalinių paviršių (Minami, 2009). Tribologinėse sistemose jie gali formuoti apsauginę adsorbcinę arba tribocheminę plėvelę, sumažinančią paviršių kontaktą ir pagerinančią tepimo sąlygas (Minami, 2009; Xiao et al., 2024).

Pastaraisiais metais vis dažniau nagrinėjamas grafeno ir joninių skysčių priedų derinys, nes jų sąveika gali sukelti sinerginį efektą ir pagerinti tribologines savybes. Nustatyta, kad grafenonanosluoksniai gali veikti kaip slydimo sluoksnis, o joniniai skysčiai gali formuoti apsauginę plėvelę, todėl jų kombinacija gali efektyviau sumažinti trintį ir paviršių dilimą (Hasnul et al., 2021; Liu et al., 2021).

Tyrimo tikslas – įvertinti grafeno ir joninio skysčio priedų įtaką vandens pagrindo tepimo terpės tribologinėms savybėms.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Įvertinti grafeno priedų įtaką vandens pagrindo tepamosios terpės tribologinėms savybėms.
2. Įvertinti joninio skysčio priedų įtaką vandens pagrindo tepamosios terpės tribologinėms savybėms.
3. Įvertinti grafeno ir joninio skysčio priedų kombinacijos įtaką vandens pagrindo tepamosios terpės tribologinėms savybėms.

Tyrimų objektas ir metodai

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos Inžinerijos fakulteto Tribologijos bandymų laboratorijoje. Tribologiniai bandymai atlikti naudojant keturių rutulių tribometrą (žr. 1 pav.). Ši

įranga plačiai naudojama tribologiniuose tyrimuose, siekiant įvertinti skirtingų tepimo terpių trinties ir dilimo savybes esant pastovioms apkrovos ir sukimosi greičio sąlygoms.



1 pav. Keturių rutulių tribometras

Fig. 1. Four-ball tribometer

Bandymų metu tribometro veleno sukimosi greitis buvo 1420 aps./min., o apkrova – 30 N. Visi eksperimentai buvo atliekami laboratorijos aplinkos sąlygomis, nereguliuojant temperatūros. Pradinė mėginių temperatūra skirtingų bandymų metu šiek tiek skyrėsi. Bandymų metu trinties koeficientas buvo nuolat registruojamas naudojant „PicoLog“ programinę įrangą, kuri leido fiksuoti trinties koeficiento kitimą viso bandymo metu ir vėliau atlikti duomenų analizę.

Tyrimuose kaip kontrolinė tepimo terpė buvo naudojamas dejonizuotas vanduo. Vanduo šiame tyrime buvo pasirinktas kaip paprasta bazinė terpė, leidžianti aiškiau įvertinti grafeno ir joninio skysčio priedų poveikį trinties ir dilimo procesams. Kadangi pats vanduo pasižymi palyginti prastomis tepimo savybėmis dėl mažo klampumo ir silpnos apsauginės plėvelės formavimo ant paviršių, priedų įtaka tokioje terpėje gali būti lengviau pastebima.

Tyrimo buvo naudojamos vandens pagrindu sudarytos terpės, naudojant skirtingus priedus, siekiant įvertinti jų įtaką tribologinėms savybėms:

1. Kontrolinė terpė – dejonizuotas vanduo.
2. Terpė Nr. 1 – dejonizuotas vanduo su 0,08 % koncentracijos lengvos frakcijos grafeno priedu.
3. Terpė Nr. 2 – dejonizuotas vanduo su 0,12 % koncentracijos sunkios frakcijos grafeno priedu.
4. Terpė Nr. 3 – dejonizuotas vanduo su 1 % koncentracijos jonizuoto skysčio priedu.
5. Terpė Nr. 4 – dejonizuotas vanduo su 0,08 % koncentracijos lengvos frakcijos grafeno ir 1 % joninio skysčio priedų kombinacija.

Tiriamosios terpės buvo paruoštos maišant nustatytos koncentracijos priedus su dejonizuotu vandeniu, naudojant magnetinę maišyklę. Grafeno priedai buvo disperguojami maišymo metu, siekiant užtikrinti tolygų dalelių pasiskirstymą terpėje, o joninis skystis įmaišomas iki vienalytės terpės susidarymo. Prieš bandymus mėginiai papildomai sumaišomi, siekiant sumažinti galimą dalelių nusėdimą.

Kiekvienai tiriamai terpei buvo atlikti 2 atskiri tribologiniai bandymai, kurių metu buvo registruojamas trinties koeficientas ir stebimas trinties režimo kitimas. Po bandymų buvo atlikta kontaktinių paviršių mikroskopinė analizė, siekiant įvertinti nusidėvėjimo pobūdį skirtingose terpėse ir palyginti paviršių pažeidimų charakteristikas.

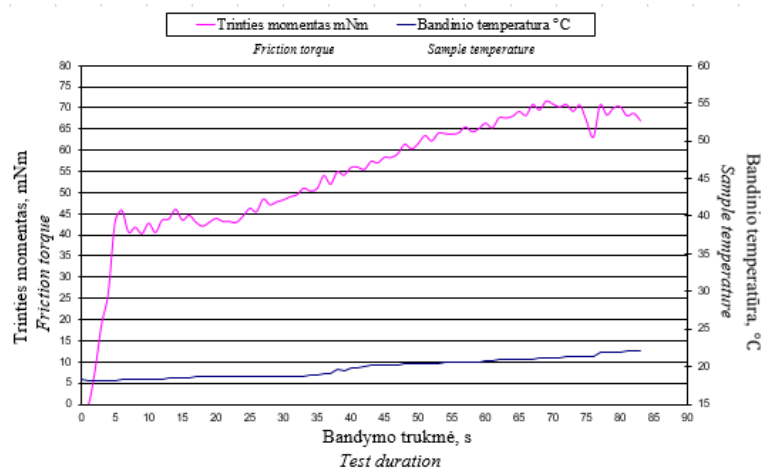
Numatytoji bandymo trukmė buvo 60 minučių. Bandymų metu trinties procesas buvo stebimas iki momento, kai pasireiškėdavo akustiniai ribinio tepimo požymiai. Tokiu atveju bandymas buvo nutraukiamas siekiant išvengti intensyvaus paviršių pažeidimo ir įvertinti skirtingų tepimo terpių gebėjimą užtikrinti stabilų trinties režimą.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Tribologinių bandymų metu buvo registruojamas trinties momentas ir bandinio temperatūra skirtingose vandens pagrindo terpėse su įvairiais priedais. Kadangi bandymai buvo nutraukiami pasireiškus akustiniams ribinio tepimo požymiams, skirtingų bandymų trukmė nebuvo vienoda. Todėl rezultatų analizėje pagrindinis dėmesys skiriamas trinties momento kitimo tendencijoms ir jų stabilumui bandymo metu.

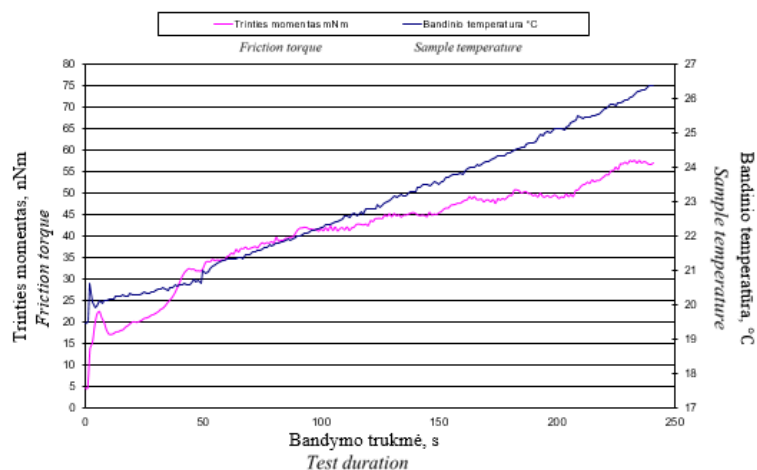
Kontrolinio bandymo rezultatai, gauti naudojant dejonizuotą vandenį kaip bazinę terpę, pateikti 2 paveiksle.

Iš 2 paveikslų matyti, kad bandymo pradžioje trinties momentas per pirmąsias sekundes padidėja ir pasiekia apie 45 mNm. Ši fazė siejama su paviršių prisidirbimu ir tikrojo kontaktinio ploto formavimusi. Vėliau stebimas trumpas trinties stabilizavimasis, tačiau tolesnėje bandymo eigoje trinties momentas palaipsniui didėja. Maždaug ties 70-ta bandymo sekunde atsiranda akustinis garsas, bandymas nutraukiamas. Bandymo pabaigoje trinties momento reikšmė pasiekė apie 70 mNm. Toks trinties momento didėjimas rodo, kad naudojant dejonizuotą vandenį stabilus tepimo režimas nėra užtikrinamas ir kontaktuojantys paviršiai patiria vis didesnę tarpusavio sąveiką. Šis trinties momento didėjimas siejamas su tuo, kad vanduo nesugeba suformuoti stabilios apsauginės plėvelės, todėl didėja tiesioginis paviršių kontaktas. Bandymo metu taip pat stebimas bandinio temperatūros didėjimas nuo maždaug 18 °C iki apie 22 °C, kas siejama su didėjančia trinties energijos disipacija kontaktinėje zonoje.



2 pav. Trinties momento ir temperatūros kitimas naudojant dejonizuotą vandenį
Fig. 2. Variation of friction torque and temperature when using deionized water

Siekiant įvertinti grafeno priedo įtaką vandens pagrindo terpės tribologinėms savybėms, buvo atliktas bandymas naudojant 0,08 % koncentracijos lengvos frakcijos grafeną. Bandymo metu registruotas trinties momento ir temperatūros kitimas, kurie pateikti 3 paveiksle.

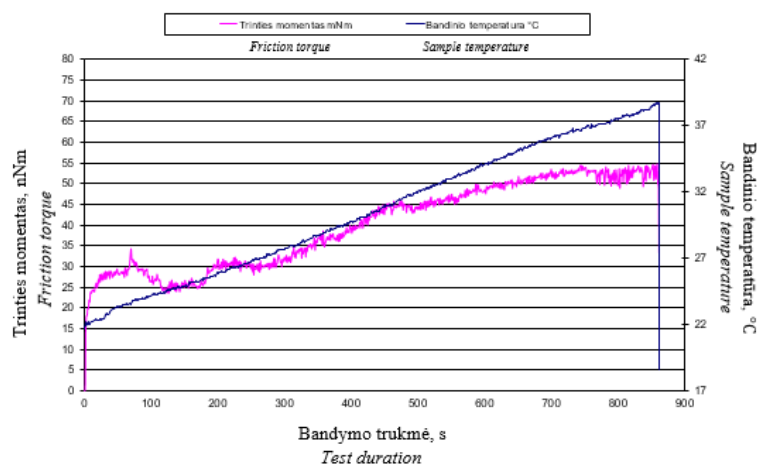


3 pav. Trinties momento ir temperatūros kitimas naudojant dejonizuotą vandenį su 0,08 % lengvos frakcijos grafeno priedu
Fig. 3. Variation of friction torque and temperature during testing with deionized water containing 0.08% light-fraction graphene additive

Iš 3 paveikslo matyti, kad naudojant grafeno priedą trinties momento kitimas yra stabilesnis nei naudojant vien tik vandenį. Bandymo pradžioje trinties momentas yra palyginti mažas ir palaipsniui didėja viso bandymo metu. Bandymo pabaigoje trinties momentas pasiekia apie 55–58 mNm, o tai yra mažesnė reikšmė nei kontrolinio bandymo su vandeniu metu. Taip pat pastebima, kad bandymas trunka gerokai ilgiau nei naudojant vien tik vandenį, kas rodo stabilesnį tepimo režimą kontaktinėje zonoje. Trinties sumažėjimas gali būti siejamas su grafeno sluoksnine struktūra, leidžiančia dalelėms veikti kaip slydimo sluoksnis tarp kontaktuojančių paviršių. Bandymo metu stebimas ir bandinio temperatūros didėjimas, kuris siejamas su ilgesne bandymo trukme ir trinties energijos išsiskyrimu kontaktinėje zonoje.

Siekiant įvertinti sunkios frakcijos grafeno priedo įtaką vandens pagrindo terpės tribologinėms savybėms, buvo atliktas bandymas naudojant 0,12 % koncentracijos grafeną. Trinties momento ir temperatūros kitimas bandymo metu pateiktas 4 paveiksle.

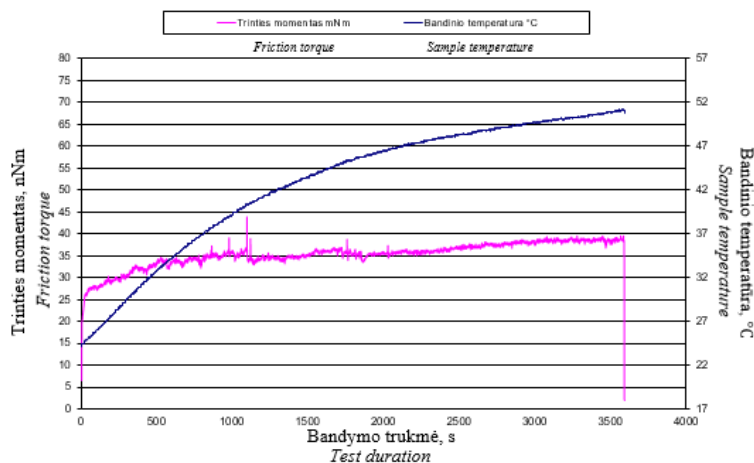
Iš 4 paveikslo matyti, kad naudojant sunkios frakcijos grafeno priedą trinties momentas bandymo pradžioje greitai padidėja iki maždaug 25–30 mNm, tačiau vėliau jo kitimas tampa santykinai stabilus. Tolimesnėje bandymo eigoje trinties momentas palaipsniui didėja ir bandymo pabaigoje pasiekia apie 55 mNm. Lyginant su kontroliniu bandymu naudojant vien tik dejonizuotą vandenį, trinties momentas išlieka mažesnis, o bandymo trukmė yra žymiai ilgesnė, kas rodo stabilesnį tepimo režimą kontaktinėje zonoje. Taip pat stebimas bandinio temperatūros didėjimas nuo maždaug 22 °C iki apie 37–38 °C, kuris siejamas su ilgesne bandymo trukme ir trinties energijos išsiskyrimu kontaktinėje zonoje. Grafeno dalelės gali veikti kaip kietųjų dalelių priedas, sudarydamos slydimo sluoksnį tarp kontaktuojančių paviršių ir taip mažindamos jų tarpusavio sąveiką.



4 pav. Trinties momento ir temperatūros kitimas naudojant dejonizuotą vandenį su 0,12 % sunkios frakcijos grafeno priedu
Fig. 4. Variation of friction torque and temperature during testing with deionized water containing 0.12% heavy graphene fraction additive

Lyginant su lengvos frakcijos grafeno priedu, sunkios frakcijos grafeno bandyme stebima gerokai ilgesnė stabilus trinties režimo trukmė. Ilgesnė stabilus tepimo režimo trukmė gali būti siejama su didesnių grafeno dalelių gebėjimu efektyviau formuoti apsauginį sluoksnį kontaktinėje zonoje.

Siekiant įvertinti joninio skysčio priedo įtaką vandens pagrindo terpės tribologinėms savybėms, buvo atliktas bandymas naudojant 1 % koncentracijos joninį skystį. Trinties momento ir temperatūros kitimas bandymo metu pateiktas 5 paveiksle.



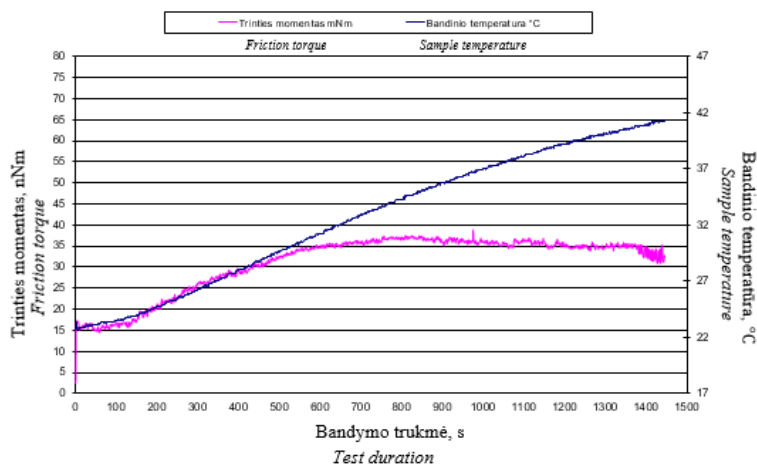
5 pav. Trinties momento ir temperatūros kitimas naudojant dejonizuotą vandenį su 1 % joninio skysčio priedu
Fig. 5. Variation of friction torque and temperature during testing with deionized water containing 1% ionic liquid additive

Iš 5 paveikslą matyti, kad naudojant joninio skysčio priedą trinties momentas bandymo pradžioje greitai padidėja iki maždaug 30–35 mNm, o vėliau išlieka gana stabilus didžiąją bandymo dalį. Tolimesnėje bandymo eigoje trinties momentas kinta nedaug ir bandymo pabaigoje pasiekia apie 38–40 mNm. Lyginant su ankstesniais bandymais naudojant tik vandenį arba grafeno priedus, šiuo atveju stebima žymiai ilgesnė stabilus tepimo režimo trukmė. Bandymas tęsiasi daugiau kaip 3500 s, kas rodo, kad joninis skystis gali efektyviai sumažinti paviršių tarpusavio sąveiką ir pagerinti tepimo sąlygas kontaktinėje zonoje. Bandymo metu taip pat stebimas temperatūros didėjimas nuo maždaug 23 °C iki apie 52 °C, kuris siejamas su ilga bandymo trukme ir trinties energijos išsiskyrimu kontaktinėje zonoje. Ilga stabilus tepimo režimo trukmė siejama su joninio skysčio gebėjimu adsorbuoti ant metalinių paviršių ir formuoti apsauginę tribologinę plėvelę, kuri mažina tiesioginį paviršių kontaktą ir stabilizuoja trinties procesą.

Siekiant įvertinti grafeno ir joninio skysčio priedų kombinacijos įtaką vandens pagrindo terpės tribologinėms savybėms, buvo atliktas bandymas naudojant 0,08 % lengvos frakcijos grafeną ir 1 % joninį skystį. Trinties momento ir temperatūros kitimas bandymo metu pateiktas 6 paveiksle.

Iš 6 paveikslą matyti, kad naudojant grafeno ir joninio skysčio priedų kombinaciją trinties momentas bandymo pradžioje greitai padidėja iki maždaug 15–20 mNm, o vėliau palaipsniui didėja ir stabilizuojasi apie 34–36 mNm ribose. Tolimesnėje bandymo eigoje trinties momentas išlieka gana stabilus ir bandymo pabaigoje šiek tiek sumažėja iki maždaug 32–34 mNm. Lyginant su kontroliniu bandymu naudojant vien tik dejonizuotą vandenį, trinties momentas yra žymiai mažesnis, o stabilus tepimo režimo trukmė gerokai ilgesnė. Taip pat pastebima, kad grafeno ir joninio skysčio kombinacijos bandymas trunka ilgiau nei naudojant tik grafeno priedus, tačiau trumpiau nei naudojant vien tik joninį skystį. Trumpesnė bandymo trukmė, lyginant su vien tik joniniu skysčiu, gali būti siejama su galimu grafeno dalelių aglomeracija arba jų sąveika su joniniu skysčiu, dėl ko gali sumažėti apsauginės plėvelės efektyvumas. Bandymo metu

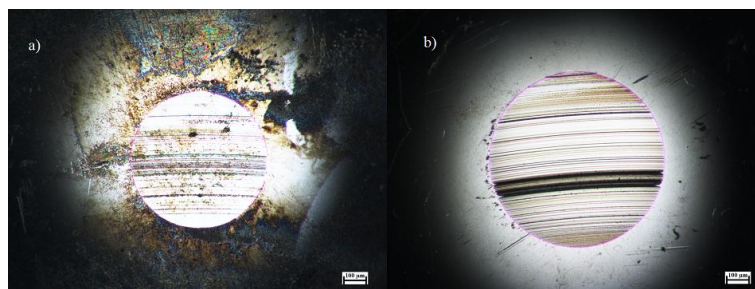
taip pat stebimas bandinio temperatūros didėjimas. Bandymo metu taip pat stebimas bandinio temperatūros didėjimas nuo maždaug 23 °C iki apie 42 °C, kuris siejamas su trinties energijos išsiskyrimu kontaktinėje zonoje. Grafeno dalelės gali veikti kaip slydimo sluoksnis tarp kontaktuojančių paviršių, o joninis skystis gali formuoti adsorbcinę apsauginę plėvelę, todėl jų kombinacija gali pagerinti tepimo sąlygas ir sumažinti paviršių tarpusavio sąveiką.



6 pav. Trinties momento ir temperatūros kitimas naudojant dejonizuotą vandenį su grafeno ir joninio skysčio priedų kombinacija
Fig. 6. Variation of friction torque and temperature during testing with deionized water containing a combination of graphene and ionic liquid additives.

Lyginant su bandymu naudojant vien tik joninį skystį, grafeno ir joninio skysčio kombinacijos bandymo trukmė yra trumpesnė, tačiau trinties momentas išlieka šiek tiek mažesnis. Tai rodo, kad grafeno dalelės gali papildomai sumažinti trintį kontaktinėje zonoje. Nors stabilus tepimo režimo trukmė šiuo atveju nėra didesnė nei naudojant vien tik joninį skystį, grafeno ir joninio skysčio kombinacija gali pagerinti tepimo efektyvumą sumažindama paviršių tarpusavio sąveiką.

Po bandymų taip pat buvo atlikta kontaktinių paviršių mikroskopinė analizė, siekiant įvertinti nusidėvėjimo pėdsakų pobūdį skirtingose tepimo terpėse.



7 pav. Kontaktinių paviršių nusidėvėjimo dėmės po tribologinių bandymų naudojant: a) dejonizuotą vandenį su 0,08 % lengvos frakcijos grafeno priedu b) dejonizuotą vandenį su 0,08 % grafeno ir 1 % joninio skysčio priedų kombinacija
Fig. 7. Wear scars on the contact surfaces after tribological tests using: a) deionized water with 0.08% light-fraction graphene additive; b) deionized water with a combination of 0.08% graphene and 1% ionic liquid additives.

Iš 7 paveikslų galima matyti kontaktinių paviršių nusidėvėjimo dėmes po bandymų naudojant grafeno priedą ir grafeno bei joninio skysčio priedų kombinaciją. Naudojant grafeno priedą paviršiuje matomi ryškūs abrazyvinio nusidėvėjimo grioveliai ir oksidacijos požymiai, kurie gali būti siejami su vandens pagrindo terpės koroziniu poveikiu. Tuo tarpu naudojant grafeno ir joninio skysčio kombinaciją paviršiaus pažeidimai yra tolygesni, o korozijos požymiai mažiau ryškūs, kas gali būti siejama su pagerėjusiomis tepimo ir apsauginėmis savybėmis kontaktinėje zonoje.

Išvados

1. Grafeno priedų naudojimas vandens pagrindo terpėje sumažina trinties momentą ir prailgina stabilus tepimo režimo trukmę. Sunkios frakcijos grafinas pasižymėjo geresnėmis tribologinėmis savybėmis nei lengvos frakcijos grafinas.
2. Joninio skysčio priedas reikšmingai pagerino vandens pagrindo terpės tribologines savybes ir užtikrino ilgiausią stabilus tepimo režimo trukmę tarp visų tirtų terpių.
3. Grafeno ir joninio skysčio priedų kombinacija sumažina trinties momentą kontaktinėje zonoje. Mikroskopinė paviršių analizė parodė, kad naudojant šią kombinaciją nusidėvėjimo pėdsakai yra tolygesni, nors stabilus tepimo režimo trukmė buvo trumpesnė nei naudojant vien tik joninį skystį.

Literatūra

- 1.Hasnul, M. H., MohdZulkifli, N. W., Hassan, M., Zulkifli, S. A., MohdYusoff, M. N. A., &Zakaria, M. Z. (2021). Synergistic behavior of graphene and ionic liquid as bio-based lubricant additive. *Lubricants*, 9(5), 46.<https://doi.org/10.3390/lubricants9050046>
- 2.Holmberg, K., &Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5(3), 263-284.<https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
- 3.Liu, L., Zhou, M., Mo, Y., Bai, P., Wei, Q., Jin, L., ... & Tian, Y. (2021). Synergistic lubricating effect of graphene/ionic liquid composite material used as an additive. *Friction*, 9(6), 1568-1579. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0442-8>
- 4.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>
- 5.Minami, I. (2009). Ionic liquids in tribology. *Molecules*, 14(6), 2286-2305.<https://doi.org/10.3390/molecules14062286>
- 6.Morshed, A., Wu, H., & Jiang, Z. (2021). A comprehensive review of water-based nanolubricants. *Lubricants*, 9(9), 89.<https://doi.org/10.3390/lubricants9090089>
- 7.Nosonovsky, M., &Bhushan, B. (2010). Green tribology: principles, research areas and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1929), 4677-4694. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0200>
- 8.Rahman, M. H., Warneke, H., Webbert, H., Rodriguez, J., Austin, E., Tokunaga, K., ... & Menezes, P. L. (2021). Water-based lubricants: Development, properties, and performances. *Lubricants*, 9(8), 73.<https://doi.org/10.3390/lubricants9080073>
- 9.Xiao, N., Wu, C., Yang, K., & Tang, J. (2024). Progress of multidimensional nano-additives under dry/liquid wear: a review. *Lubricants*, 12(10), 332.<https://doi.org/10.3390/lubricants12100332>

THE INFLUENCE OF GRAPHENE AND IONIC LIQUID ON A WATER-BASED LUBRICATING MEDIUM

Abstract

This article investigates the influence of graphene and ionic liquid additives on the tribological properties of a water-based medium. Water was selected as the base medium due to its limited lubrication properties, enabling clearer evaluation of additive effects. The study aimed to determine how different graphene fractions and concentrations, an ionic liquid, and their combination affect friction processes and surface wear. Experiments were conducted using a four-ball tribometer, measuring friction moment and temperature, and analysing wear scars. The tested media included deionized water, water with graphene, water with an ionic liquid, and their combination. The results showed that graphene reduces friction and stabilizes the lubrication regime, while the ionic liquid provides the longest stable lubrication due to the formation of a protective film; however, although their combination reduces friction, it does not always ensure longer lubrication stability than the ionic liquid alone.

Keywords: graphene, ionic liquids, tribology, water-based lubricating medium, coefficient of friction, wear, nanoparticles, lubricant additives.