

ALYVOS 0W16 ILGALAIKIS TRIBOLOGINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

Henrikas ŠALČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: henrikas.salcius@vdu.lt

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

Santrauka

Alyvos tribologinės savybės yra vienas iš svarbiausių veiksnių, lemiančių mechaninių sistemų veikimo efektyvumą ir jų ilgaamžiškumą. Tačiau dauguma mokslinių tyrimų dažniausiai apsiriboja trumpalaikėmis analizėmis, o ilgalaikiai eksperimentiniai tyrimai atliekami palyginti retai. Šiame darbe buvo tiriama 0W–16 klampumo klasės variklinė alyva: nauja ir naudota po 7000 km ir 14000 km eksploatacijos. Tyrimai atlikti taikant keturių rutulių tribologinį bandymą. Eksperimentai vykdyti esant 1500 aps./min. sukimosi greičiui ir taikant ciklinį apkrovos režimą. Trinties momentas buvo registruojamas viso bandymo metu, o dilimo pėdsakai analizuojami naudojant mikroskopinius tyrimo metodus. Tyrimo rezultatai parodė, kad nauja alyva pasižymi daugiau kaip 30 % mažesniu trinties koeficientu ir dilimo intensyvumu, palyginti su naudota alyva. Gauti rezultatai leidžia teigti, kad ilgalaikių tribologinių eksperimentų metu nustatyti alyvos savybių pokyčiai gali turėti reikšmingos įtakos vertinant gamintojų rekomenduojamus alyvos keitimo intervalus.

Reikšminiai žodžiai: variklinė alyva, 0W–16, Toyota, trinties koeficientas, dilimas, trinties momentas, keturių rutulių mašina.

Įvadas

Žmonijos mobilumas, krovinių gabenimas ir ekonomikos augimas yra neatsiejami nuo technikos progreso. Nuo pat gamybos pradžios automobilių ir kitų mobilumą užtikrinančių transporto priemonių konstrukcija buvo nuolat tobulinama. Visuose mechanizmuose didėjo apkrovos ir judėjimo greičiai, ženkliai išaugo kontaktiniai slėgiai ir slydimo bei riedėjimo greičiai. Dėl šių priežasčių techninis tobulėjimas neatsiejamas nuo didėjančių reikalavimų eksploatacinėms medžiagoms. Maža to, pastaraisiais dešimtmečiais prisidėjo ekologiniai reikalavimai, sudarę prielaidas tiek mechanizmų, tiek ir eksploatacinių skysčių tobulinimui.

Mechanizmų ilgaamžiškumas, be jokios abejonės, tiesiogiai priklauso nuo eksploatacinių skysčių kokybės. Siekiant užtikrinti geras darbo sąlygas, ilgaamžiškumą ir ekonomiškumą varikliuose ir transmisijose būtina naudoti kokybiškas alyvas. Eksploatacijos eigoje alyvos sensta ir užsiteršia, todėl keičiasi jų savybės – prastėja tepimas, keičiasi klampa ir spalva, atsiranda kietų priemaišų, alyvos praranda pradines savybes. Minėtų savybių blogėjimo greitis labiausiai priklauso nuo eksploataavimo sąlygų. Neišvengiamas užteršimas deginiais, aplinkos oru ir drėgme stipriai paspartina variklio alyvos senėjimą. Ši alyva daug greičiau sensta nei transmisinė. Pastarosios darbo sąlygas kontroliuoti yra daug paprasčiau. Būtent šie veiksniai ir skatina gilintis į variklių alyvų senėjimo priežastis ir tendencijas, nagrinėti susidarancius pakitimus ir jų priežastis. Taigi, šio baigiamojo darbo tikslas siejamas su eksploatuojant neišvengiamai vykstančiu variklio alyvos senėjimu ir su tuo susijusiais savybių pokyčiais.

Variklio alyvos buvo tobulinamos jau daugybę metų. Jų senėjimo tendencijos ir priežastys yra plačiai ištirtos ir pasiūlyti sprendimai alyvų senėjimui bei savybių kitimui sulėtinti. Vis dėlto, alyvų senėjimo visiškai sustabdyti dar nepavyko, o naujai atrandamos bazinės alyvos ir jų savybes geriantys priedai sudaro prielaidas tolimesniems alyvų tobulinimams. Variklių alyvų senėjimo tyrimai pagelbėja variklių gamintojams kurti ilgaamžiškesnes alyvas ir jų priedus, kurie prailgina alyvos keitimo intervalus ir pagerina variklio darbo efektyvumą. Jie taip pat suteikia žinių apie optimalius variklio techninės priežiūros intervalus, atsižvelgiant į eksploataavimo sąlygas, variklio konstrukciją ir alyvos sudėtį.

Tyrimo tikslas – išanalizuoti variklinės alyvos savybių kitimą eksploatacijos metu.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Ištirti variklinių alyvų tribologinių savybių kitimą eksploatacijos metu.
2. Nustatyti pasirinktos alyvos trinties paviršių nudilimus prie skirtingo kilometražo.
3. Pateikti nudilimo grafikus ir išanalizuoti nudilusią rutuliukų dėmių nuotraukas.

Tyrimų objektas ir metodai

Šio tyrimo objektas yra SAE 0W–16 klampumo klasės bazinė ir modifikuota įvairiais priedais variklinė alyva. Ši alyva pasirinkta dėl naujausių technologinių sprendimų ir yra naudojama Lietuvoje vienuose populiariausių eksploatuojamų automobilių, kaip „Toyota“ ir „Lexus“. Tyrime naudojama pilnai sintetinė alyva 0W–16 „Toyota“ gamintojo, API SP klasifikacijos, kuri pasižymi: mažu peleningumu (mažiau sulfatinių pelenų, fosforo ir sieros), apsauga nuo LSPI (*low-speed pre-ignition*), geresne grandinės ir turbokompresoriaus apsauga. Alyvai modifikuoti buvo naudojami tokie priedai kaip molibdenai, cinkas, fosforas, kalcis, magnis, boras, silicis. Kadangi realių trinties ir tepimo atvejų yra gana daug, tai ir bandymų metodų yra palyginti daug. Šiame tyrime buvo naudotos skirtingai eksploatuotos

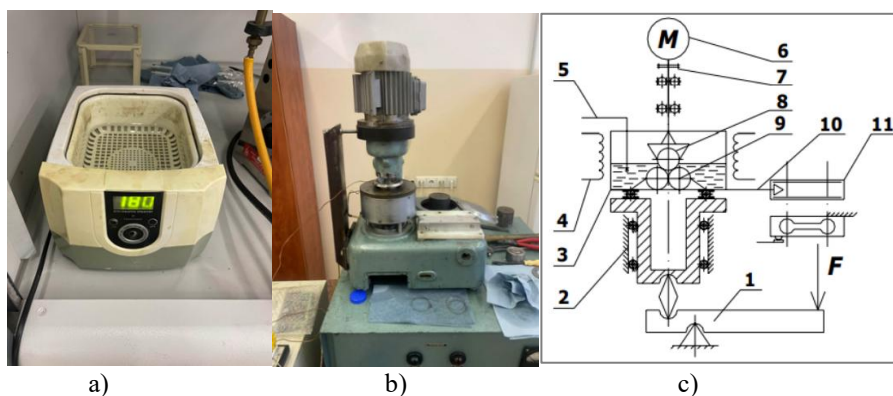
alyvos mėginiai – neeksploatuotos, 7000 km ir 14000 km. Šiame tyrime bandymai atlikinėjami su keturių rutuliukų mašina (žr. 1 pav.). Atliekant variklinių alyvų tribologinius tyrimus įrenginiu MAST – 1, duomenų registravimui naudota: įmonės Pico Technology ADC keitiklis ADC200-20, temperatūros matuoklis TC-08 ir K tipo termopora, Scaime BEF-1 jėgos jutiklis ir signalo stiprintuvas CPJ2S. PicoLog Recorder programine įranga registruotas tarp trinties paviršių susidarantis trinties momentas, tiriamos tepamosios medžiagos ir aplinkos temperatūra. Duomenų registravimo periodiškumas – 1 s (parinkta atlikus preliminarinius bandymus). Pasibaigus bandymui, duomenys iš šios programos įkelti į „Microsoft Excel“ programą, kur jie buvo apdorojami statistiškai.

Variklinių alyvų tyrimui keturių rutulių įrenginyje naudoti 12,7 mm skersmens 45Cr6

($E = 21,98 \cdot 10^4$ MPa; $\nu = 0,3$) plieno rutuliai. Trys rutuliai įtvirtinami nejudamai įtvare ir pritvirtinami tepalo indo dugne. Vienas tyrimo metu besisukantis rutulys įtvirtinamas variklio veleno suklyje, įleistas į tepalo indą, centruotas, kad vienodai liestų visus tris tvirtai įtvirtintus rutulius ir tyrimo metu sukta 1420 min⁻¹. Į tepalo indą pilama apie 22 ml tiriamos tepamosios medžiagos. Šio kiekio pakanka tepalo inde esantiems rutuliams visiškai apsemti.

Ant apkrovos svirties dedama 1,5 kg svarstis sudaryti 150 N apkrovai rutulių kontakte. Į alyvą merkiama tepamosios medžiagos temperatūrą registruojanti K – tipo termopora. Įrenginys paleidžiamas tyrimui. Tyrimo trukmė 60 min. Tarp rutulių susidarantį trinties momentą matuoja pjezoelektrinis jutiklis. Po tyrimo matuojamas ant rutulių susidariusių dilimo pėdsakų skersmuo (nejudančių trijų rutulių dilimo pėdsakas skritulys, besisukančio rutulio dilimo pėdsakas – juosta). Dilimo pėdsakų matmenys nustatomi optiniu mikroskopu matuojant 6·10⁻⁵ mm tikslumu.

Gautas dilimo pėdsakų skersmuo ir trinties momentas bandymo metu yra pagrindinis alyvų savybių vertinimo kriterijus.



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

1 pav. Keturių rutulių trinties bandymas: a) ultragarso vonelė b) 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) ultrasound bath b) 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 kadrų per sekundę), temperatūros matuoklis Mastech MS6514, duomenų registravimui programa PicoLog Recorder.

Visų pirma, rutuliukai ir su alyva besikontaktuojančios įrenginio dalys yra valomos ultragarsinėje vonelėje apie minutes, nusausinamos ir nuvalomos acetonu. Pirmasis eksperimentinis bandymas buvo atliktas su standartinė alyva 0W-16 gamintojo „Toyota“, kuri dar nebuvo eksploatuota, įpilta 22 ml mėginio į keturių rutulių mašinos tiriamosios medžiagos indą, kuriame yra nejudamai 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 apkraunama 150 N jėga pridirbimui, o po pridirbimo 300 N jėga. Stendą paleidus matuojamas trinties momentas, kuris susidaro tarp rutulių ir yra gaunamas per jėgos jutiklį. Bandomos alyvos temperatūra ir trinties momentas registruojami PicoLog Recorder programine įranga, kas 1 s dažnumu, išsaugant kompiuteryje. Tyrimui atlikti mašina buvo nustatyta, kad viršutinis rutulys sukėtųsi 1500 min⁻¹ dažniu, dviem režimais, pirmas pridirbimo atveju naudojant 150 N jėgą, 60 min., pridirbimas reikalingas, kad užtikrintų optimalų sąlyčio paviršių adaptaciją, sumažintų pradinės 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 cikliška, 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 16 °C iki 26 °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 0W–16 alyvomis, kurių dirbo atitinkamai 7000 km ir 14000 km. Atlikus tribologinius bandymus su 4 rutulių stendu gauti nudilimo dėmės taikant 150 N apkrovą. Nauja alyva turėjo mažiausią nudilimo dėmę, o eksploatuotai 7000 km nudilimo skersmuo padidėjo 28 %, o nuvažiavusiai 14000 km padidėjo 32 %, lyginant su nauja alyva. Tai reiškia, kad automobilis, nuvažiuodamas vis didesnę atstumą, alyva tampa vis blogesnės kokybės ir su dar ilgesne eksploatacija alyva tampa lyg kenkėjas vidiniams variklio elementams. Analizuojant gautus duomenis buvo nustatomi alyvų ilgalaikės tribologinės savybės: stabilumas, veiksmingumas ekstremaliomis sąlygomis, trinties koeficientai ir dilimo dydžiai.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

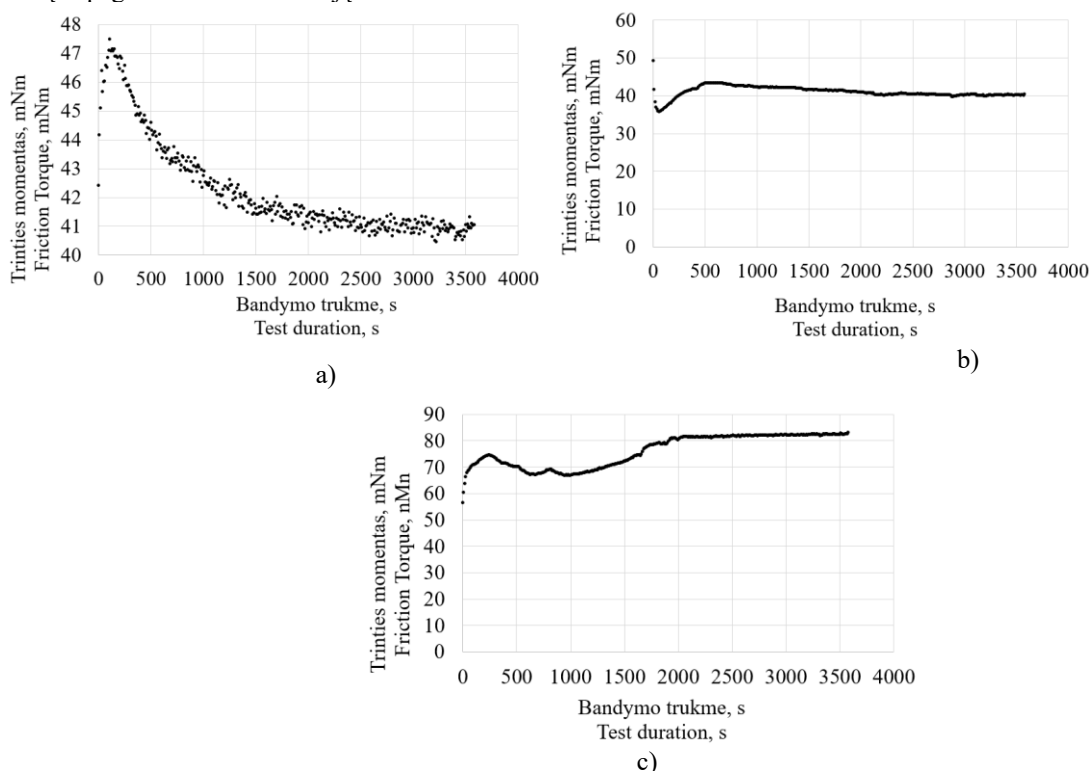
Atlikus tyrimus ir apdorojus gautus duomenis, visų pirma buvo analizuojama trinties momento priklausomybė nuo ciklų skaičiaus, tiek su bazine 0W–16 alyva gamintojo „Toyota“ eksperimentiniai rezultatai pateikiami (žr. 2 pav.), vaizduojantys sukimo momento pokyčius per visą bandymo trukmę iki 4000 s.

- Pradiniame etape (0–1000 s) visais atvejais pastebėtas staigus trinties momento padidėjimas, kuris buvo susijęs su paviršiaus prisitaikymo procesu. Visiškai naujos alyvos didesnis trinties momento pakilimas yra didesnis nei jau dirbusios alyvos, o tai gali reikšti, kad dėl pradinės nanodalelių sąveikos su trinties paviršiais reikalavo papildomo paviršių prisidirbimo.

- Viduriniame etape (1000–3000 s) trinties momentas naujoje alyvoje stipriai krito. Nuo pradiniame etape didžiausios reikšmės 48 mNm krito iki 41 mNm. Naują alyvą lyginant su 7000 km eksploatuota alyva yra mažas skirtumas, kad jau dirbusios trinties momento grafikas yra tolygesnis, be drastiškų pakilimų ar nusileidimų. Tuo tarpu alyva, kuri dirbo apie 14000 km, pasiekė didesnę trinties momentą, kuris siekė apie 80 mNm. Analizuojant šiuos grafikus galima suprasti, kad naujai alyvai pradžioje reikia prisitaikyti prie darbinių paviršių, lyginant su jau dirbusia alyva. Ilgai dirbusi alyva jau praranda tepimo savybes ir trinties momento kilimas gali paveikti visus paviršius, esančius variklyje.

- Paskutiniame etape (3000–3500 s) nauja ir vidutiniškai eksploatuota alyva stabilizavosi ir tepimo savybės veikė tinkamai. Tačiau daug eksploatuotos alyvos trinties momentas palaipsniui vis kilo. Šio etapo metu galima teigti, kad prie 14000 km darbo ši alyva jau gana stipriai praranda tepimo savybes.

0W–16 variklio alyva yra labai mažo klampumo sintetinė alyva, kuri dažniausiai naudojama naujesniuose benzinu varomuose ir hibridiniuose varikliuose, kurių konstrukcija sukurta dirbti su labai plona alyva. Ji padeda sumažinti vidinę trintį ir pagerina kuro ekonomiją.

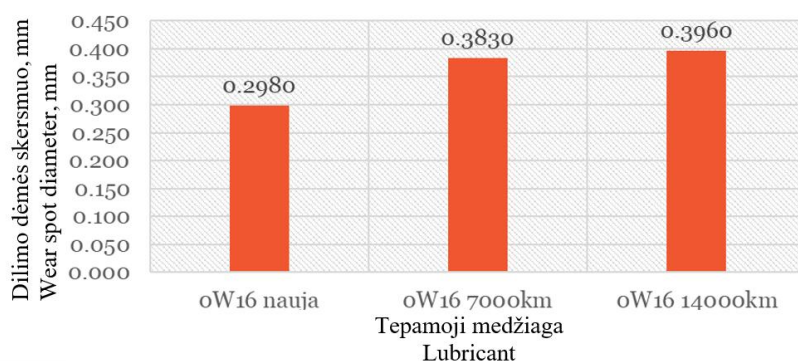


2 pav. Trinties momento priklausomybė nuo laiko, alyvos 0W–16 skirtingai dirbusios: a) nauja alyva, b) alyva važiavusi 7000 km, c) alyva važiavusi 14000 km

Fig. 2. Friction torque vs. number of cycles for 0W–16 oil with different work: a) new oil, b) oil worked for 7000km, c) oil worked for 14000km.

Optiniu mikroskopu įvertinus rutulių dilimo pėdsakus, buvo išmatuoti vidutiniai dilimo dydžiai po 3500 s (žr. 3 pav.). Gauti rezultatai parodė, kad naudojant naują alyvą, nudilimo dydžiai buvo mažesni nei naudojant jau naudotą alyvą. Vidutinė naujos 0W–16 alyvos nudilimo reikšmė buvo 0,2980 mm, o naudotos alyvos, atitinkamai 0,3830 mm ir 0,3960

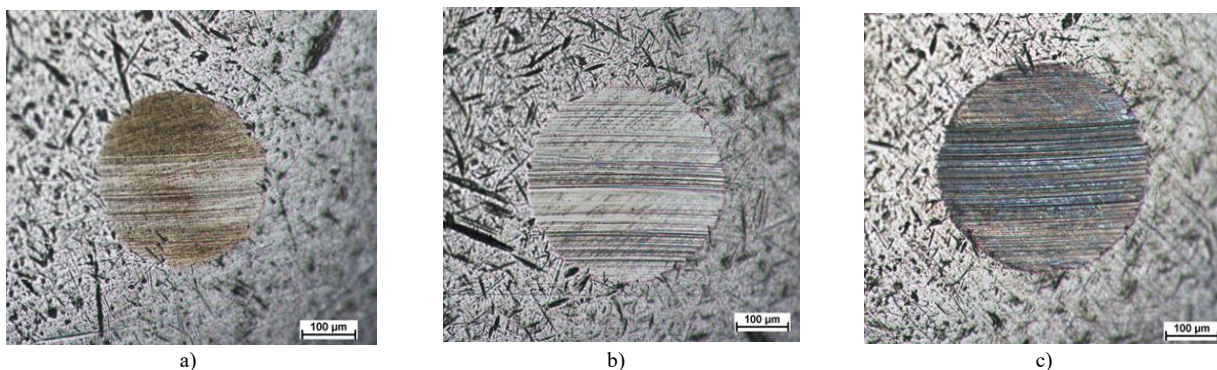
mm. Tai rodo, kad nauja alyva turi geresnes tepimo savybes, suteikiant geresnį tepimą ir apsaugą nuo paviršiaus pažeidimų. Skirtumas tarp vidutinių nudilimų ~0,1 mm, dilimas buvo mažesnis.



3 pav. Rutulių nudilimo pėdsakų vidutinio skersmens reikšmės, alyvos 0W–16 prie skirtingo kilometražo.

Fig. 3. Average diameter values of the wear traces of the balls, 0W-16 oil at different mileage

Atlikus bandymus optiniu mikroskopu buvo atlikta rutulių paviršių vaizdų fiksacija (žr. 4 pav.) naudojant 0W–16. Naujos alyvos atveju paviršius buvo lygesnis, turėjo mažiau mechaninių pažeidimų. Paviršiaus struktūros analizė rodo, kad naudojant tyrimo metu jau naudotą alyvą (žr. 4 pav. b, c) dilimo žymės yra ryškesnės ir gilesnės, o tai rodo didesnę abrazyvinį/mechaninį dilimą. Šie rezultatai patvirtina, kad nauja alyva turi tinkamą sudėtį variklio tepimui, sudarydama apsauginį tribologinį sluoksnį tarp kontaktuojančių metalinių paviršių, tačiau naudojant ji savo savybes pamažu praranda ir gali didėti tikimybė mechaniniams pažeidimams.



4 pav. Nudilusių pėdsakų vaizdai įtvirtintuose nejudamai rutuliukuose alyvos 0W–16: a) naujos alyvos, b) 7000 km dirbusios alyvos, c) 14000 km dirbusios alyvos

Fig. 4. Images of worn traces in embedded fixed balls of oil 0W-16: a) new oil, b) 7000 km worked oil, c) 14000 km worked oil

Įvertinant visus gautus rezultatus, galima daryti išvadą, kad nauja alyva turi visas reikiamas savybes, norint apsaugoti variklį nuo mechaninių pažeidimų. Normalu, kad nuo eksploatacijos laiko keičiasi ir variklio alyvos tepimo, ir apsaugos efektyvumas ir alyva, kuri yra eksploatuojama iki 15000 km (tiek, kiek „Toyota“ gamintojas rekomenduoja) jau yra praradusi gana daug savybių.

Išvados

1. Tyrimo metu buvo analizuojama, ar 0W–16 alyva, kuri nuvažiavusi skirtingus atstumus, išlaiko geras tepamąsias savybes. Turint tris mėginius pasirinktos alyvos, kurios buvo skirtingai eksploatuotos: visiškai nauja alyva bei 7000 km ir 14000 km eksploatuota. Naudojantis literatūros šaltiniais, 0W16 variklio alyva yra labai mažo klampumo sintetinė alyva, kuri dažniausiai naudojama naujesniuose benzinu varomuose ir hibridiniuose varikliuose, kurių konstrukcija sukurta dirbti su labai plona alyva. Ji padeda sumažinti vidinę trintį ir pagerina kuro ekonomiją.

2. Atlikus bandymus su skirtingai eksploatuotomis alyvomis galima spręsti, kad alyva praranda gerąsias tepimo savybes, lyginant su nauja alyva. Gauti rezultatai parodė, kad naudojant naują alyvą, nudilimo dydžiai buvo mažesni nei naudojant jau naudotą alyvą. Vidutinė naujos 0W–16 alyvos nudilimo reikšmė buvo 0,2980 mm, o naudotos alyvos, atitinkamai 0,3830 mm ir 0,3960 mm. Tai rodo, kad nauja alyva turi geresnes tepimo savybes, suteikiant geresnį tepimą ir apsaugą nuo paviršiaus pažeidimų. Skirtumas tarp vidutinių nudilimų ~0,1 mm, dilimas buvo mažesnis.

3. Išnagrinėjus alyvos trinties nudilimus bei analizuojant grafikus ir nudilimo nuotraukas, galima teigti, kad alyvai nuvažiuotas atstumas turi įtakos ir jos nekeitimas laiku trumpina variklio dalių gyvavimo laikotarpį. Įvertinant visus gautus rezultatus darbo metu, galima prieiti prie išvados, kad nauja alyva turi visas reikiamas savybes norint apsaugoti variklį nuo mechaninių pažeidimų. Normalu, kad nuo eksploatacijos laiko keičiasi ir variklio alyvos tepimo ir apsaugos

efektyvumas ir alyva, kuri yra eksploatuojama iki 15000 km (tiek kiek Toyota gamintojas rekomenduoja) jau yra praradusi gana daug savybių.

Literatūra

1. Besser, C., Agocs, A., Ronai, B., Ristic, A., Repka, M., Jankes, E., McAleese, C., & Dörr, N. (2019). Generation of engine oils with defined degree of degradation by means of a large scale artificial alteration method. *Tribology International*, 132, 39–49. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2018.12.003>
2. Dmitrieva, Z. T. (2015). Formation of Resins in Used Oils as a Result of Conformation-Structure Change of Their Hydrocarbons. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 51(5), 464–469. <https://doi.org/10.1007/s10553-015-0626-5>
3. Gołębowski, W., Wolak, A., & Šarkan, B. (2024). Engine Oil Degradation in the Real-World Bus Fleet Test Based on Two Consecutive Operational Intervals. *Lubricants*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/lubricants12030101>
4. Kupareva, A., Mäki-Arvela, P., Grénman, H., Eränen, K., Sjöholm, R., Reunanen, M., & Murzin, D. Yu. (2013). Chemical Characterization of Lube Oils. *Energy & Fuels*, 27(1), 27–34. <https://doi.org/10.1021/ef3016816>
5. Morimoto, M., Sugimoto, Y., Sato, S., & Takanohashi, T. (2014). Comparison of Thermal Cracking Processes for Athabasca Oil Sand Bitumen: Relationship between Conversion and Yield. *Energy & Fuels*, 28(10), 6322–6325. <https://doi.org/10.1021/ef501610d>
6. Rudnick, L. R. (2009). *Lubricant Additives Chemistry and Applications* Second Edition.
7. Sappok, A., Rodriguez, R., & Wong, V. (2010). Characteristics and Effects of Lubricant Additive Chemistry on Ash Properties Impacting Diesel Particulate Filter Service Life. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 3(1), 705–722. <https://doi.org/10.4271/2010-01-1213>
8. Sejkorová, M., Hurtová, I., Jilek, P., Novák, M., & Voltr, O. (2021). Study of the effect of physicochemical degradation and contamination of motor oils on their lubricity. *Coatings*, 11(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/coatings11010060>
9. Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2013). Engineering Tribology: Fourth Edition. In *Engineering Tribology: Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07515-4>
10. Topolovec-Miklozic, K., Forbus, T. R., & Spikes, H. A. (2007). Film thickness and roughness of ZDDP antiwear films. <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9189-2>
11. Tripathi, A. K., & Vinu, R. (2015). Characterization of thermal stability of synthetic and semi-synthetic engine oils. *Lubricants*, 3(1), 54–79. <https://doi.org/10.3390/lubricants3010054>
12. Wang, J., He, T., Song, C., Li, X., & Chen, B. (2019). Engine Oil Degradation Induced by Biodiesel: Effect of Methyl Oleate on the Performance of Zinc Dialkyldithiophosphate. *ACS Omega*, 4(14), 16166–16170. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02353>
13. Wang, Q. J., & Chung, Y.-W. (2013). *Encyclopedia of Tribology* (Q. J. Wang & Y.-W. Chung, Eds.). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5>
14. Wei, L., Duan, H., Jin, Y., Jia, D., Cheng, B., Liu, J., & Li, J. (2021). Motor oil degradation during urban cycle road tests. *Friction*, 9(5), 1002–1011. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0386-z>

LONG-TERM TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF 0W16 OIL RESEARCH

Abstract

The tribological properties of lubricating oil are one of the key factors determining the efficiency and durability of mechanical systems. However, most scientific studies are limited to short-term analyses, while long-term experimental investigations remain relatively rare. In this study, SAE 0W–16 engine oil was investigated in three conditions: new, and used after 7000 km and 14,000 km of operation. The experiments were carried out using a four-ball tribological test. The tests were performed at a rotational speed of 1500 rpm under a cyclic loading regime. The friction torque was recorded throughout the entire test, while the wear scars were analyzed using microscopic methods. The results showed that the new oil exhibited more than a 30% lower friction coefficient and wear intensity compared to the used oil. The obtained results suggest that the changes in oil properties identified during long-term tribological experiments may have a significant impact on the evaluation of manufacturer-recommended oil change intervals.

Keywords: engine oil, 0W-16, Toyota, coefficient of friction, wear, friction torque, four-ball machine.